



EESTI MAAÜLIKOOL

Metsandus- ja maaehitusinstituut

Tauri Taaleš

**AUDRU GNSS PÜSIJAAMA STABIILSUSE  
KONTROLLIMINE INSAR KAUGSEIRE PÕHJAL  
MÄÄRATUD MAAPINNA DEFORMATSIOONIDEGA**

**CHECKING THE STABILITY OF AUDRU GNSS BASE  
STATION WITH GROUND DEFORMATIONS  
DETERMINED BY INSAR REMOTE SENSING**

Magistritöö

Geodeesia, kinnisvara- ja maakorralduse õppekava

Juhendaja: dotsent Tarmo Kall, *PhD*

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Tauri Taaleš		Õppekava: Geodeesia, kinnisvara- ja maakorraldus	
Pealkiri: Audru GNSS püsijaama stabiilsuse kontrollimine InSAR kaugseire põhjal määratud maapinna deformatsioonidega			
Lehekülgi: 77	Jooniseid: 37	Tabeleid: 11	Lisasid: 0
Osakond: Geomaatika			
Uurimisvaldkond: P515 Geodeesia			
Juhendaja(d): Tarmo Kall, PhD			
Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu, 2021			
<p>Tänapäeval kasutatakse üha enam suuremate maa-alade parameetrite uurimiseks kaugseiret. Seoses kaugseire meetodite rohkem kasutusele võtmisega on aktuaalne uurida, kas selliseid meetodeid on optimaalne kasutada ka väiksema mastaabiga alade juures. Käesoleva magistritöö eesmärgiks on kontrollida Eestis Audru GNSS püsijaama stabiilsust interferomeetrilise tehisavaradari (InSAR) kaugseire meetodi abil määraes maapinna deformatsioone selle ümbruses. Eesmärgi saavutamiseks on hangitud satelliitradari Sentinel-1 poolt loodud maapinna kujutisi aastatel 2015-2021 ning neid interferomeetriliselt (InSAR meetodil) töödeldud. Referentspinnana on kasutatud 2015. aasta 13. jaanuari Pärnu maakonna kujutist, mille suhtes on arvutatud maapinna nihked ülejäänud kujutiste põhjal. Tulemusena on saadud maapinna deformatsioonid Pärnu maakonnas ning Audru GNSS püsijaama ümbruses. Kasutades programmi SNAP on aastate kaupa visualiseeritud keskmiste nihete kaardid Pärnu maakonnas ning arvutatud statistilised näitajad nihete kohta Audru GNSS püsijaama ümbruses. Statistiliste näitajatena on arvutatud nihete aritmeetiline keskmine, minimum, maksimum ning standardhälve. Aastate kaupa on koostatud ka aegrea graafikud nihete ning koherentsuse näitaja kohta. Saavutatud tulemuste põhjal võib väita, et uuritud aastatel on Pärnu maakonnas toimunud pigem maapinna vajumine, eriti uuritava ala keskosas. Maapinna kerkimine on esinenud looduskaitsealadel ning rannikualadel. Nihked on olnud</p>			

vahemikus -15,8 cm kuni +9 cm. Audru püsijaama ümbruses on maapinna liikumine olnud üsna stabiilne (nihked vahemikus -3 ja -4 cm), v.a. 2017. ja 2019. aastal. Aritmeetilised keskmised on antud aastatel olnud vastavalt -1,5 cm ja -6,9 cm. Kokkuvõttes saab öelda, et Audru GNSS püsijaama ümbruses on maapind üsna stabiilne. Suuremad varieeruvused on esinenud ainult aastatel 2015 ja 2019. Koherentsusnäitajatest võib järeldada, et suures osas on näitaja kehvem olnud talvel, kesksuvel ning sügisel. Selle põhjuseks võivad olla atmosfäärist tingitud vead, näiteks talvel ja sügisel on suurem niiskus. Samuti võivad tulemused olla mõjutatud taimkatte kasvust (kesksuvel). Paremate tulemute saavutamiseks oleks võimalik töödeldud piltide arvu suurendada ning ajalist jaotust vähendada või kasutada satelliitpiltide töötlemiseks püsipeegeldajate meetodit.

Märksõnad: Radar, kaugseire, InSAR

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Tauri Taaleš		Specialty: Land Surveying, Property and Land Management	
Title: Checking the stability of Audru GNSS base station with ground deformations determined by InSAR remote sensing			
Pages: 77	Figures: 37	Tables: 11	Appendixes: 0
Department: Geomatics Field of research: P515 Geodesy Supervisors: Tarmo Kall, PhD Place and date: Tartu, 2021			
Today, remote sensing is increasingly used to study the parameters of larger land areas. With the increasing use of remote sensing methods, it is important to examine whether it is optimal to use such methods in smaller areas as well. The aim of this master's thesis is to check the stability of the Audru GNSS permanent station in Estonia by using the Interferometric synthetic-aperture radar (InSAR) remote sensing method by determining the deformations of the ground around it. To achieve this goal, ground images created by satellite radar Sentinel-1 in 2015-2021 have been obtained and processed interferometrically (InSAR method). The image of Pärnu County of 13 January 2015 has been used as the reference surface, for which the ground displacements have been calculated on the basis of the remaining images. As a result, ground deformations have been obtained in Pärnu County and around the Audru GNSS fixed station. Using the SNAP program, maps of average displacements in Pärnu county have been visualized by years, and statistical indicators of displacements around the Audru GNSS fixed station have been calculated. The arithmetic mean, minimum, maximum and standard deviation of displacements have been calculated as statistical indicators. Time series graphs for the deformations and the coherence indicator have also been compiled. Based on the results, it can be stated that in the studied years there has rather been a subsidence of the ground in Pärnu county, especially in the central part of the studied area. Ground uplift has			

occurred in nature reserves and coastal areas. The displacements have been between -15.8 cm and +9 cm. In the vicinity of the Audru station, the movement has been quite stable (displacements between -3 and -4 cm), except for 2017 and 2019. The arithmetic means have been -1.5 cm and -6.9 cm, respectively. In conclusion, it can be said that the ground around the Audru GNSS fixed station is quite stable. Larger variations have occurred only in 2015 and 2019. It can be concluded from the coherence indicators that to a large extent the indicator has been worse in winter, mid-summer and fall. This may be due to atmospheric errors, such as higher humidity in winter and fall. The results may also be affected by vegetation growth (mid-summer). For better results, it would be possible to increase the number of processed images and reduce the time distribution, or to use the method of persistent scatterers to process satellite images.

Keywords: Radar, remote sensing, InSAR

# SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	8
1. RADAR.....	10
2. TEHISAVARADAR.....	14
2.1. Tehisavaradari ajalugu.....	14
2.2. Tehisavaradari tööpõhimõte ja omadused .....	19
2.3. Tehisavaradari tehnikad.....	27
2.3.1. Polarimeetria .....	27
2.3.2. Interferomeetriline tehisavaradar .....	27
2.3.3. Diferentsiaalne interferomeetriline tehisavaradar .....	30
2.3.4. Püsipeegeldajate interferomeetriline tehisavaradar .....	33
2.4. Tehisavaradari kasutusvaldkonnad.....	34
2.5. Interferomeetrilise tehisavaradari veaallikad.....	35
3. SENTINEL-1 MISSIOON.....	37
4. METOODIKA JA LÄHTEANDMED .....	40
4.1. Lähteandmed .....	40
4.2. Metoodika.....	41
4.2.1. Andmete registreerimine .....	42
4.2.2. Interferogrammi moodustamine ja sidususe hindamine.....	42
4.2.3. Geokodeerimine .....	44
4.2.4. Tulemuste visualiseerimine, statistiliste näitajate arvutamine ja andmete eksportimine.....	44
5. TÖÖ TULEMUSED JA ARUTELU .....	45
5.1. 2015. aasta tulemused.....	45
5.2. 2016. aasta tulemused.....	48
5.3. 2017. aasta tulemused.....	51
5.4. 2018. aasta tulemused.....	54
5.5. 2019. aasta tulemused.....	57
5.6. 2020. aasta tulemused.....	60
5.7. 2021. aasta tulemused.....	63
5.8. 2015-2021 aasta tulemused .....	66
KOKKUVÕTE.....	70

KASUTATUD KIRJANDUS .....	72
---------------------------	----

## SISSEJUHATUS

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on kontrollida Eestis Audru GNSS püsijaama stabiilsust interferomeetrilise tehisavaradari (InSAR) kaugseire meetodi abil määraates maapinna deformatsioone GNSS püsijaama ümbruses. Eesmärgi saavutamiseks on hangitud satelliitradari poolt loodud maapinna kujutisi aastatel 2015-2021 ning neid interferomeetriliselt töödeldud. Kasutatud on ainult Sentinel-1 satelliitmissiooni tooteid. Referentspinnana on kasutatud 2015. aasta 13. jaanuari Pärnu maakonna kujutist, mille suhtes on arvatud maapinna nihked ülejäänud kujutiste põhjal. Tulemuseks on saadud maapinna deformatsioonid Pärnu maakonnas ning Audru GNSS püsijaama ümbruses.

Tehisavaradarit on Maa kaugseireks kasutatud üle 30 aasta, kuna sellega on võimalik teha kõrge eraldusvõimega kujutisi sõltumatult ilmastikust ning kellaajast. Maa uurimine kasutades kosmoses paiknevaid vahendeid on optimaalne viis, et uurida suuremastaabilisi alasid. Seoses kaugseire meetodite rohkem kasutusele võtmisega on aktuaalne uurida, kas selliseid meetodeid on optimaalne kasutada ka väiksema mastaabiga alade juures.

Käesolev töö on jagatud kaheks osaks: teoreetiliseks ja empiiriliseks osaks. Teoreetilises osas (peatükid 1-3) antakse ülevaade radari ja tehisavaradari (SAR) ajaloost ja tehisavaradari tööpõhimõtetest ning omadustest. Lisaks on iseloomustatud erinevaid SAR tehnikaid ning InSAR meetodi veaallikaid. Samuti on antud ülevaade ka Sentinel-1 satelliitmissioonist.

Empiirilises osas (peatükid 4-5) on metoodika ja lähteandmete peatükis antud ülevaade lähteandmetest ning nende töötlemisest. Kirjeldatud on lähteandmete saamise viisi. Samuti on detailselt kirjeldatud satelliitkujutiste töötlemise etappe. Tulemuste peatükis on välja toodud töötlemise käigus saadud tulemused. Visualiseeritud on aastate kaupa keskmiste nihete kaardid Pärnu maakonnas, arvatud aastate kaupa statistilised näitajad nihete kohta Audru GNSS püsijaama ümbruses. Statistiliste näitajatena on arvatud nihete aritmeetiline keskmine,



minimum, maksimum ning standardhälve. Viimaseks on koostatud aastate kaupa graafikud nihete aegrea ning koherentsuse näitaja aegrea kohta.

# 1. RADAR

Radar (*Radio Detection And Ranging*) on raadiolainetel põhinev seiresüsteem objektide kauguse, suuna või kiiruse tuvastamiseks. Seda on pikka aega kasutatud sõjalistel ja mittesõjalistel eesmärkidel mitmesugustes rakendustes, nagu skaneerimine, juhtimine, kaugseire ja globaalne positsioneerimine. Radarit hakati arendama 1920. aastatel. 1922. aastal tuli Taylor välja esimese pideva lainega radarisüsteemiga. 1934. aastal arendati USA mereväe uurimislabori (*Naval Research Laboratory*) (NRL) poolt välja esimene impulssradarisüsteem, mis töötas sagedusel 60 MHz. Esimesed radarisüsteemid õhusõidukite jälgimiseks ja tuvastamiseks töötati 1930. aastate alguses välja Suurbritannias ning Saksamaal. 1952. aastal töötas Carl A. Wiley (Goodyear Aerospace Corporation) välja *Doppler Beam Sharpening* meetodi (radarisignaalide töötlemiseks kasutatakse filtreerivaid elektriahelaid). Arizonas Litchfieldis asuva Goodyeari uurimisüksuse radarirühm arendas kasutades Wiley ideed välja esimese õhus töötava SAR-süsteemi, mis lendas lennuki Douglas DC-3 pardal esmakordselt 1953. aastal. 1950. aastate lõpus ja 1960. aastate alguses tegeleti salastatult SAR-i süsteemide arendusega Michigani Ülikoolis ning ka mõnes eraettevõttes. Paralleelselt toimusid sarnased arengud ka teistes riikides, nagu Venemaa, Prantsusmaa ja Ühendkuningriik (Chan&Koo, 2008). Esimene satelliit esimese tehisavaradariga (SAR) ja muude kosmoses kasutatavate radari instrumentidega pardal oli Maa ookeanide kaugseirele pühendatud satelliit Seasat (joonis 1.1). Seasati jälgedes on aastakümnete jooksul käinud mitmed hilisemad SAR-missioonid (tabel 1.1). Näiteks Shuttle Image Radar (SIR) missioonidel kasutati kosmosesüstikute pardal eelmise Seasati missiooni osi, et testida SAR-pildirakendusi maakasutuses, geoloogias, hüdroloogias ja metsanduses (Paek, 2020).



**Joonis 1.1.** Seasat satelliit (Moreira, 2013)

**Tabel 1.1.** Tehisavaradari missioonid 2018 aasta seisuga (Paek, 2020)

Missioon	Riik	Tööperiood	Laine-riba	Mass (kg)	Kiire laius (km)	Resolutsioon (m,Az-R)
SeaSat	USA	1978	L	2290	100	6–25
SIR-A1/B1	USA	1981, 1984	L	2460	50	7–25/6–13
ERS-1/2	Euroopa	1991–2010	C	2384	100	6–26
		1995–2011		2516	100	6–26
ALMAZ-1	USSR	1991–1992	S	3420	280	8–15
JERS-1	Jaapan	1992–1998	L	1400	75	18–18
SIR-C/X	Multi	1994	C,L/X	11,000	90	7.5–13/6–10
RADARSAT-1	Kanada	1995–2013	C	3400	500	8–8
SRTM1	Multi	2000	C,X	13,600	100	15–8/8–19
ENVISAT	Euroopa	2002–2012	C	8210	100	6–9 (SM)
					405	80–8 (SC)
ALOS	Jaapan	2006–2011	L	3850	70	10–10 (high)

**Tabel 1.1. järg** Tehisavaradari missioonid 2018 aasta seisuga (Paek, 2020)

Missioon	Riik	Tööperiood	Laine-riba	Mass (kg)	Kiire laius (km)	Resolutsioon (m,Az-R)
					30	10–30 (polar)
					350	100–100 (SC)
SAR-Lupe	Saksamaa	2006–	X	770	-	-
RADARSAT-2	Kanada	2007–2020	C	2200	18	0.8–1.6 (SL)
					100	8–9 (std)
					500	70–70 (SC)
Cosmo-Skymed	Itaalia	2007–	X	1700	10	1–1 (SL)
					40	3–3 (SM)
					200	30–30 (SC)
TerraSAR-X	Saksamaa	2007–2020	X	1230	10	1–1 (SL)
					30	3–1 (SM)
					270	40–2 (SC)
TecSAR	Iisrael	2008–	X	260	-	-
TanDEM-X	Saksamaa	2009–2020	X	1230	-	Sama mis TSX
RISAT-1	India	2012–2017	C	1860	10	1–1
					25	3–4
					220	48–8
HJ-1C	Hiina	2012–2016	S	890	100	5–20
KOMPSat-5	Lõuna-Korea	2013–2020	X	1400	18	1–1 (high)
					30	3–3 (std)
					100	5–5 (wide)
Sentinel 1A/B	Euroopa	2014–	C	2300	80	4–2 (SM)
		2016–			400	43–8 (TS)
ALOS 2	Jaapan	2014–2020	L	2120	25	1–3 (SL)
					70	5–9 (SM)
					490	60–45 (SC)
PAZ	Hispaania	2015–	X	1230	10	1–1 (SL)
					30	3–1 (SM)
					100	20–20 (SC)
RCM	Kanada	2017–	C	1430	20	1–1 (SL)

**Tabel 1.1. järg** Tehisavaradari missioonid 2018 aasta seisuga (Paek, 2020)

Missioon	Riik	Tööperiood	Laine- riba	Mass (kg)	Kiire laius (km)	Resolutsioon (m,Az-R)
					30	3–10 (SM)
					500	40–40 (SC)
SAOCOM	Argentiina	2018–	L	3000	30	10 (Az, SM)
					350	100 (Az, TS)

RADAR (*Radio Detection And Ranging*) töötab nagu välkkaamera, kuid raadiosagedusel. Tüüpiline radarisüsteem koosneb saatjast, lülitist, antennist, vastuvõtjast ja andmesalvestist. (Chan&Koo, 2008). Saatja saadab raadiolained skaneeritava objekti poole. Raadiolained peegelduvad objekti pealt tagasi vastuvõtjasse. Uuritava objekti liikumissuuna ja -kiiruse tuvastamiseks võrreldakse väljasaadetud lainete pikkust tagasipeegelduvate lainete lainepikkusega. Samuti on võimalik lainete peegeldumise tugevuse abil hinnata objekti materjali (näiteks elektrit juhtiv aine, nt metall või kõrge veesisaldusega materjal, peegeldab paremini).

Radarit kandev platvorm lendab konstantsel kiirusel. Radari pikk antenn tekitab lehvikukujulise kiire, mis skaneerib (suunab kunstlikke raadiolaineid objektide poole) maapinda. Lennusuunas skaneeritava kujutise eraldusvõime määratakse kiire laiusega, lennusuunaga risti kujutise eraldusvõime aga impulsi pikkusega. Mida suurem on antenn, seda väiksema objekti saab radar tuvastada (Chan&Koo, 2008). Radari toimimist mõjutavad ilmastiku ja päikesevalguse tingimused vähem kui optiliste andurite omadusi. Pardasensoritega satelliidid pakuvad raskesti ligipääsetavatest piirkondadest või suurtest aladest, mis võivad mehitamata õhusõidukite (UAV) või maapealsete platvormide jaoks olla liiga kulukad, optimaalsemaid skaneerimisvõimalusi. Seda siiski tingimisel et kõik platvormid annavad kalibreerimise kaudu ühtsed tulemused (Paek, 2020).

## 2. TEHISAVARADAR

### 2.1. Tehisavaradari ajalugu

Tehisavaradarit ehk SAR-i on Maa kaugseireks kasutatud rohkem kui 30 aastat. SAR-iga on võimalik Maast teha nii päeval kui öösel ilmastikust sõltumatuid kõrge eraldusvõimega pilte mitmete rakenduste jaoks, alates geoteaduste ja kliimamuutuste uuringutest, keskkonna- ja Maa-süsteemi seirest, 2-D ja 3-D kaardistamisest, muutuste tuvastamisest, 4-D kaardistamisest (ruum ja aeg), turvalisusega seotud rakendustest kuni planeedi uurimiseni (Moreira jt, 2013).

Tehisavaradari leiutamise puhul oli tegu olulise verstapostiga õhus ja kosmoses paiknevate radarite väljatöötamisel ka järgnevatel aastakümnetel. 1950-1960 aastatel kasutati SAR-süsteeme põhiliselt sõjalisteks uuringuteks, luuretegevuseks ning inimese loodud sihtmärkide tuvastamiseks. 1970-1980 aastatel arendati ka tsiviilrakenduste jaoks välja mitu õhusõidukisüsteemi lõppeesmärgiga leida Maa parameetreid. Õhus paiknevate SAR süsteemide tehnoloogia areng oli väga kiire, võimaldades demonstreerida uusi tehnikaid ja rakendusi, mida hiljem rakendati ka kosmoses paiknevatel SAR-missioonidel (Moreira jt, 2013).

Euroopas, Jaapanis ja Kanadas käivitati 1990 aastatel vastavalt ERS 1/2 (C-riba), JERS-1 (L-riba) ja Radarsat-1 (C-riba) satelliidid, mis märkisid järgmist verstaposti kosmoses paiknevate SAR-süsteemide arengus. 1980. ja 1990. aastatel töötati välja ka uusi SAR-i tehnikaid erinevate eesmärkide täitmiseks, nagu polarimeetria parameetrite paremaks leidmiseks, interferomeetria pinna topograafia tuletamiseks ja diferentsiaalne interferomeetria maapinna nihkumise mõõtmiseks. ERS 1/2 ja hilisemate ENVISAT / ASAR (C-riba) andmete põhjal arendati välja veel üks SAR tehnika – püsipeegeldajatega (PS) diferentsiaalne SAR-interferomeetria vajumise jälgimiseks. Tegemist oli esimese SAR-satelliidiga, mis kasutas antenni tehnoloogiat koos saatmis- / vastuvõtumoodulitega suurema paindlikkuse saavutamiseks radari antennikiire

juhtimisel ja seetõttu ka erinevate skaneerimis režiimide valimisel. Tänapäeval töötab arvukateks rakendusteks üle 15 kosmoses paikneva SAR-süsteemi (Moreira jt, 2013).

SAR süsteemid jagunevad kandeplatvormide suhtes kahte rühma: õhusõidukitel töötavad SAR süsteemid ning satelliidi või kosmosesüstiku pardal töötavad süsteemid. Mainitud rühmad erinevad mahu poolest, õhusõidukitel töötavad SAR süsteemid skaneerivad väiksemat maa-ala ning seega on ka andmemaht väiksem. Kosmosepõhistel süsteemidel on väiksem langemisnurk ja suurem kiirte laius, kuid nende kogutud andmemaht on palju suurem (Chan&Koo, 2008). Kiiratud vihu laius varieerub õhusõiduki puhul tavaliselt mõnest kilomeetrist kuni 20 km-ni ja kosmoselennul 30–500 km-ni (Moreira jt, 2013).

Hetkel töötab üle 15 kosmoses paikneva SAR-anduri ja järgmise viie aasta jooksul käivitatakse 10 uut SAR-süsteemi (tabel 2.1). Tehisavaradari teeb ainulaadseks asjaolu, et see on võimeline tegema suure eraldusvõimega 2D kujutisi (Moreira jt, 2013) ning see on aktiivne mikrolainetega skaneerimise meetod, s.t see töötab sõltumatult valgustusest, pilvkattest ning ei sõltu ka ilmastikutingimustest. Praegused kosmosesüsteemid kasutavad lainepikkusi 3–25 cm ja eraldusvõime on 10–50 m (tabel 2.2) (Bamler, 2000). Sellised omadused tagavad Maa pinna dünaamiliste protsesside jälgimise usaldusväärsel, pideval ja globaalsel viisil (Moreira jt, 2013).

SAR-süsteemid skaneerivad Maad lennusuuna suhtes ristsihis ja need põhinevad impulssradaril, mis on paigaldatud edasiliikuvale platvormile (Moreira jt, 2013).

**Tabel 2.1.** Ülevaade kosmosepõhistest SAR sensoritest ja nende põhiomadused (Moreira jt, 2013)

Sensor	Tööperiood	Laineriba (Polarisatsioon)	Märkused	Institutsioon, Riik
Seasat	1978-1978	L (HH)	Esimene tsiviil SAR-satelliit, töökorras ainult ca. kolm kuud	NASA/JPL, USA

**Tabel 2.1. järg** Ülevaade kosmosepõhistest SAR sensoritest ja nende põhiomadused (Moreira jt, 2013)

Sensor	Tööperiood	Laineriba (Polarisatsioon)	Märkused	Institutsioon, Riik
ERS-1/2	1991–2000/ 1995–2011	C (VV)	Euroopa kaugseire satelliidid (esimesed Euroopa SAR-satelliidid)	ESA, Euroopa
J-ERS-1	1992–1998	L (HH)	Esimene Jaapani SAR-i satelliit	JAXA, Jaapan
SIR -C/X-SAR	1994 aprill-1994 aprill ja 1994 september-1994 oktoober	L ja C (quad) X (VV)	Kosmoses mitme sagedusega SAR esmakordne demonstreerimine	NASA/JPL, USA DLR, Saksamaa ASI, Itaalia
Radarsat-1	1995–2013	C (HH)	Esimene Kanada SAR-i satelliit, kiire laius kuni 500 km koos ScanSAR-i skaneerimisrežiimiga	CSA, Kanada
SRTM	2000 veebruar- tänapäev	C (HH+VV) ja X (VV)	Topograafiamissioon, esimene kosmoses paiknev interferomeetriline SAR	NASA/JPL, USA DLR, Saksamaa ASI, Itaalia
ENVISAT/ASAR	2002–2012	C (dual)	Esimene SAR-satelliit saatmis- / vastuvõtumooduli tehnoloogiaga, kiire laius kuni 400 km	ESA, Euroopa
ALOS/PalSAR	2006–2011	L (quad)	Täiustatud maavaatlussatelliit (Daichi), kiire laius kuni 360 km	JAXA, Jaapan
TerraSAR -X/ TanDEM -X	2007– tänapäev/2010– tänapäev	X (quad)	Esimene bistaatiline radar kosmoses, eraldusvõime kuni 1m, globaalne topograafia saadaval 2014. aasta lõpuks	DLR/Astrium, Saksamaa



**Tabel 2.1. järg** Ülevaade kosmosepõhistest SAR sensoritest ja nende põhiomadused (Moreira jt, 2013)

Sensor	Tööperiood	Laineriba (Polarisatsioon)	Märkused	Institutsioon, Riik
Radarsat-2	2007–tänapäev	C (quad)	Eraldusvõime kuni: 1 m x 3 m (asimuut x vahemik), kiire laius kuni 500 km	CSA, Kanada
COSMO -SkyMed- 1/4	2007–tänapäev	X (dual)	Nelja satelliidi konstellatsioon, eraldusvõime kuni 1 m	ASI /MiD, Itaalia
Cosmo-SkyMed II generatsioon	2019–tänapäev			
RISAT -1	2012–tänapäev	C (quad)	Järgnev satelliit (RISAT -1a) käivitatakse 2016. aastal, RISAT-3 (L-riba) on väljatöötamisel	ISRO, India
HJ-1C	2012–tänapäev	S (VV)	Nelja satelliidi konstellatsioon, esimene satelliit käivitati 2012. aastal	CRESDA /CAST / NRSCC, Hiina
KOMPSat-5	2013–tänapäev	X (dual)	Korea mitmeotstarbeline satelliit 5, eraldusvõime kuni 1m	KARI, Korea
PAZ	2018–tänapäev	X (quad)	Konstellatsioon koos TerraSAR -X ja TanDEM -X-iga planeeritud	CDTI, Hispaania
ALOS -2	2014–tänapäev	L (quad)	Eraldusvõime kuni: 1 m x 3 m (asimuut x vahemik), kiire laius kuni 490 km	JAXA, Jaapan
Sentinel-1a/1b	2014- tänapäev/2016- tänapäev	C (dual)	Kahe satelliidi konstellatsioon, kiire laius kuni 400 km	ESA, Euroopa

**Tabel 2.1. järg** Ülevaade kosmosepõhistest SAR sensoritest ja nende põhiomadused (Moreira jt, 2013)

Sensor	Tööperiood	Laineriba (Polarisatsioon)	Märkused	Institutsioon, Riik
Radarsat Constellation-1/2/3	2019-tänapäev	C (quad)	Kolme satelliidi konstellatsioon, kiire laius kuni 500 km	CSA, Kanada
SAOCOM -1/2	2018-tänapäev	L (quad)	Kahe satelliidi konstellatsioon, täielikult polarimeetiline	CONAE, Argentiina
NISAR	Kavandatud aastaks 2022	L ja S (multi)	Esimene satelliitmissioon, mis kasutab kahte erinevat radarsagedust (L- ja S-riba), et mõõta Maa pinnal vähem kui sentimeetri ulatuses esinenud muutusi	NASA ja ISRO, USA ja India

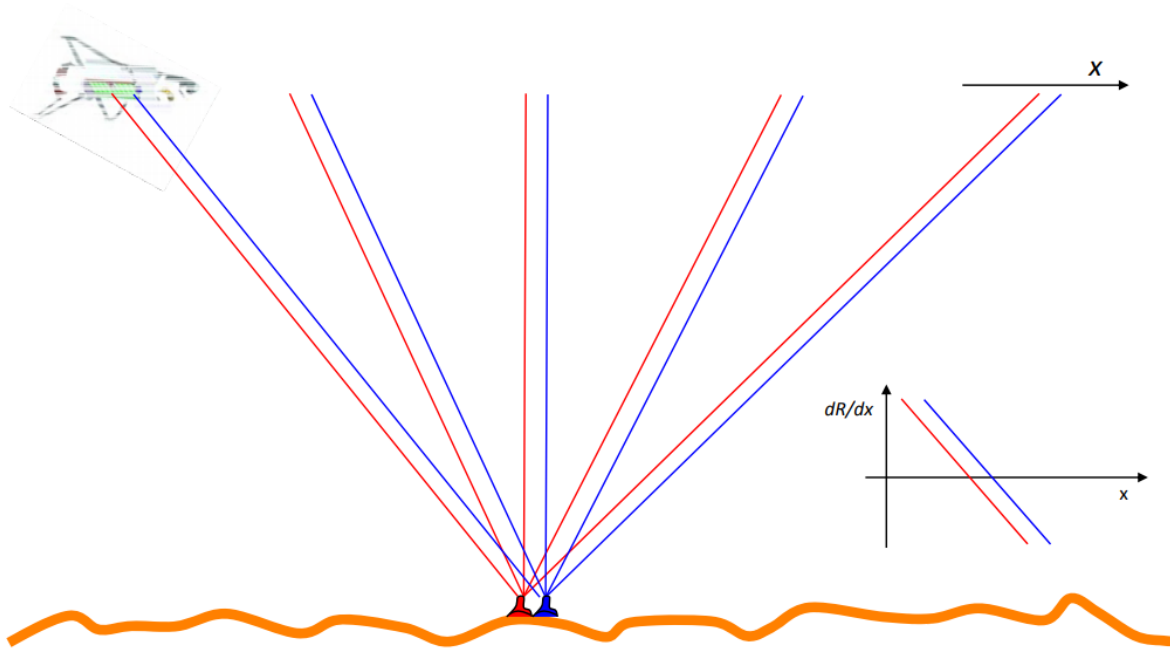
**Tabel 2.2.** SAR-süsteemides kasutatavad sagedusribad ja nendega seotud lainepikkuste vahemikud (Moreira jt, 2013)

Laineriba	Ka	Ku	X	C	S	L	P
Sagedus [GHz]	40–25	17.6–12	12–7.5	7.5–3.75	3.75–2	2–1	0.5–0.25
Lainepikkus [cm]	0.75–1.2	1.7–2.5	2.5–4	4–8	8–15	15–30	60–120

SAR-süsteemides tavaliselt kasutatavad sagedusribad ja nendega seotud lainepikkuste vahemikud on toodud tabelis 2.2.

## 2.2. Tehisavaradari tööpõhimõte ja omadused

SAR-i puhul on tegu liikuvale platvormile paigaldatud skaneeriva radariga. Sarnaselt tavapärasele radarile edastatakse elektromagnetlaineid järjestikku ja tagasi peegeldunud signaalid kogutakse radari antenni abil (joonis 2.1). Radarit kandva platvormi liikumise tõttu on järjestikune signaali edastamise ja vastuvõtmise aeg erinev (Moreira jt, 2013). Igas asendis edastatakse impulss, tagasi peegeldunud signaalid läbivad vastuvõtja ja salvestatakse (Chan&Koo, 2008). Edastatud impulss reageerib Maa pinnaga ja ainult osa sellest peegeldatakse tagasi vastuvõtvasse antenni, mis võib olla sama kui edastatav antenn (monostaatilise radari puhul) või teine (kahe- või mitme staatilise radari puhul). Tagasi peegeldunud signaali amplituud ja faas sõltuvad kujutatava objekti füüsilistest (st geomeetriast, karedusest) ja elektrilistest omadustest (st läbilaskvusest). Sõltuvalt sagedusribast võib esineda märkimisväärt läbitungimist, nii et kujutatavad objektid ja meediumid tuleb modelleerida ruumalana (nt taimestik, jää ja lumi, kuiv pinnas). Elektromagnetiliste impulsside suurem tungimine meediumisse toimub radarisüsteemide puhul, mis kasutavad pikemaid lainepikkusi ning millel on tagasi peegeldunud signaalis tavaliselt rõhutatud mahtu (Moreira jt, 2013).

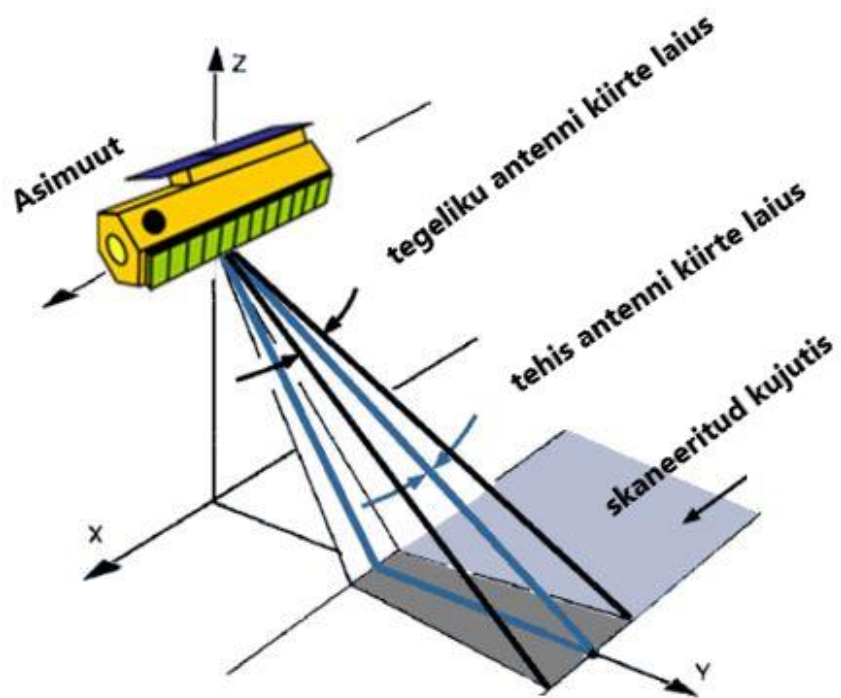


**Joonis 2.1.** SAR tööpõhimõte (punased ja sinised jooned tähistavad edastatud ja tagasi peegeldunud signaale (Younis, 2015))

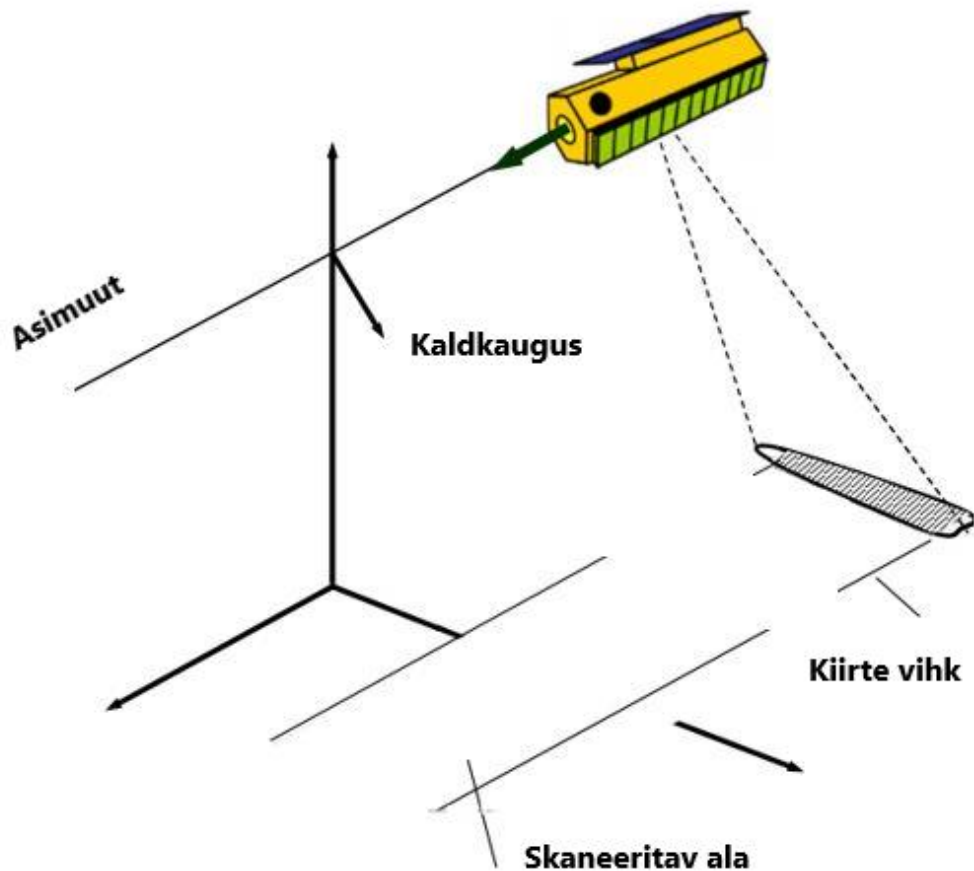
Vastuvõetud signaalide sobiv koherentne kombinatsioon võimaldab luua virtuaalse ava, mis on palju pikem kui füüsiline antenni pikkus (joonis 2.2). See pildiradarile omane omadus annab tehisavaradarile „tehisava“ nimetuse (Moreira jt, 2013). SAR-i puhul on tegemist külgvaatelise radariga (joonis 2.3), mis salvestab vastuvõetud peegeldused ühtselt, see tähendab, et see tuvastab peegeldunud signaali amplituudi ja faasi kvadratuurse demodulatsiooni abil. Selle tulemuseks on keeruline algandmete maatriks, kus iga valim koosneb reaalsest (faasisisesest) ja imaginaar (kvadratuur) osast (Bamler, 2000). SAR-signaal sisaldab teavet amplituudi ja faaside kohta. Amplituud on radarivastuse tugevus ja faas on ühe siinuslaine täisvõnke (ühe SAR-lainepikkuse) murdosa. SAR-pildi faas määratakse peamiselt satelliidi antenni ja maapinna sihtmärkide vahelise kauguse järgi (Interferometry 2021).

Järgnevas arvutusintensiivse digitaalse signaalitöötluse etapis korrigeeritakse toorandmete maatriksi kajajooni ja summeeritakse nii, et simuleerida pikka antenni. Selle teravustamistoimingu sooritamiseks mõeldud tarkvara- või riistvarasüsteeme nimetatakse SAR-protssessoriteks (Bamler, 2000).

SAR-i töötlemine hõlmab Doppleri sageduse variatsioonide sobitamist ja demoduleerimist, reguleerides tagasipöörduvate peegelduste sageduse variatsioone maapinna igast punktist. Selle sobitatud filtri tulemus on kõrge eraldusvõimega kujutis (Chan&Koo, 2008).



**Joonis 2. 2.** „Tehisava“ radar (Younis, 2015)

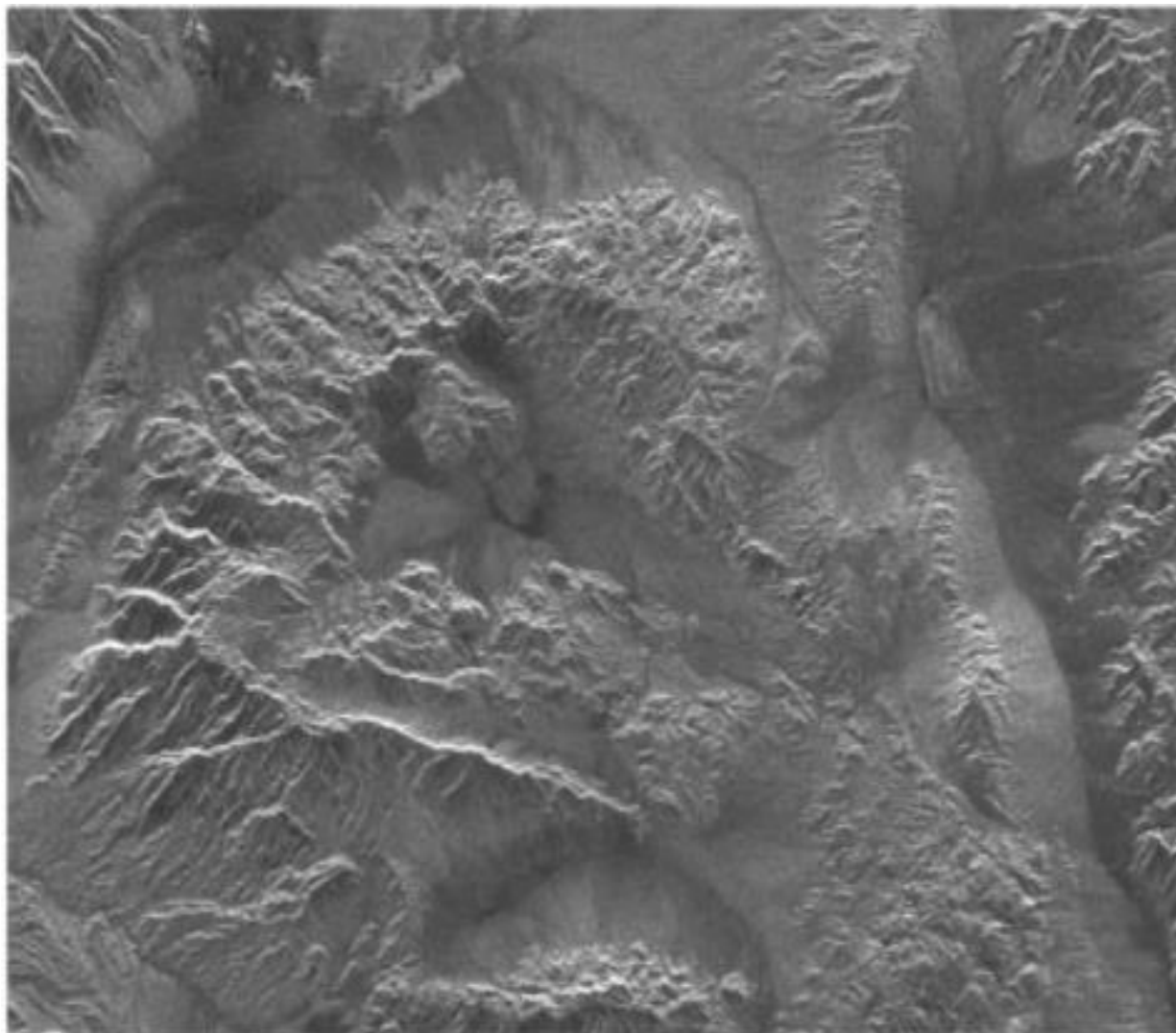


**Joonis 2.3.** Külgvaateline radar (Younis, 2015)

Tehisavaradari tooteks on 2-D kujutis mikrolainete peegelduvusest skaneeritud alal eraldusvõimega suurusjärgus 0,2–100 m. SAR-l on mõned huvitavad omadused, mis puuduvad optilistel anduritel (Bamler, 2000):

- SAR on aktiivne skaneerimise meetod, mis suunab kunstlikke raadiolaineid objektide poole ja on seega päikese valgustusest sõltumatu.
- SAR kasutab mikrolaineid, mis tungivad läbi pilvede ja (osaliselt) võrastiku, mulla ja lume. Tüüpilised lainepikkused on 3 cm (X-riba), 6 cm (C-riba) ja 24 cm (L riba).
- SAR kasutab polariseeritud kiirgust ja seetõttu saab peegeldajate polariseerimistunnusied kasutada peegeldaja struktuuri kohta lisateabe saamiseks
- SAR on sidus skaneerimismeetod, mis on SAR-interferomeetria eelduseks, kuid segajate tõttu muudab see tehisavaradari kujutiste radiomeetrilise tõlgendamise keeruliseks.

Tehisavaradari kõige rohkem teavet sisaldava kujutise tüüp on kompleksne üksikkujutis (ERS-keeles: SLC ehk *single look complex*). Sageli ei huvita meid kujutise pikslite faas, st kasutame tuvastatud (amplituudi või intensiivsusega) kujutisi (Bamler, 2000).



**Joonis 2.4.** Tehisavaradari kujutis mäeahelikust Mojave kõrbes (Bamler, 2000)

Tehisavaradari kujutiste (joonis 2.4) puhul võivad erinevad parameetrid mõjutada täheldatavalt radari heledust kujutisel. Lisaks uuritavas alas olevate peegeldajate omadustele määravad piksli heleduse ka sensori parameetrid, nagu lainepikkus, polarisatsioon, vaatenurk ja eraldusvõime. Näiteks läbivad pikemad lainepikkused võrastikku paremini kui lühemad. Kõrge

eraldusvõimega SAR-kujutised võimaldavad metsastunud aladel tekstuuristruktuuri analüüsi, samas kui madala eraldusvõimega SAR võib tekstuuri teavet hägustada (Bamler, 2000).

Uuritava alal radari piksli heledust mõjutavad domineerivad parameetrid on järgmised (Bamler, 2000):

- Pinna konarlikkus
- Langemisnurk (maastiku nõlvad, geomorfoloogia)
- Peegeldajate tihedus (nt biomass, lehtede tihedus)
- Peegeldajate 3D jaotus (võrade paksus, puutüved, hooned)
- Dielektriline konstant (peegeldaja materjal, mulla niiskus, taimestiku seisund)

SAR-i kaugseire sobib kasutamiseks eriti troopilistes riikides. Töösageduse õige valiku abil võib mikrolainesignaal tungida läbi pilvede, udu, vihma väga väikese sumbumisega, võimaldades seeläbi töötada ebasoodsates ilmastikutingimustes, mis välistavad nähtava/infrapuna süsteemi kasutamise. Kuna SAR on aktiivne andur, mis ei vaja valgustusallikat, võib see töötada päeval või öösel; suudab valida muutuva otsimisakna ja laia ala katvuse. Lisaks saab topograafilise muutuse tuletada radari interferomeetriat kasutava mõõtmise faaside erinevusest. SAR on osutunud väga kasulikuks paljudes rakendustes, sealhulgas mere ja jää seire, kaevandamine, naftareostuse seire, okeanograafia, lumeseire, maastiku klassifikatsioon jne. SAR-i potentsiaal erinevates rakendustes viis mitmete õhus ja kosmoses paiknevate SAR-süsteemide väljatöötamiseni (Chan&Koo, 2008).

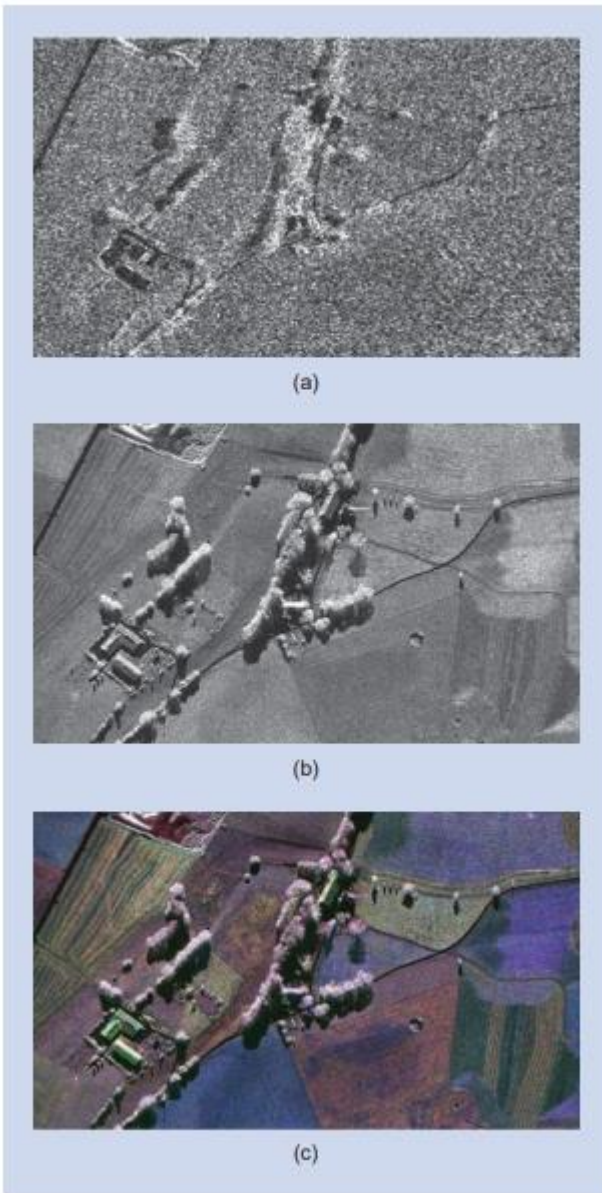
Viimastel aastakümnetel on tohutult suurenenud Maa seire rakenduste arv, mis kasutavad ära kõrge eraldusvõimega SAR-kujutiste ainulaadseid omadusi. Maapinna dünaamiliste protsesside uurimiseks on suurenenud nõudlus võimalikult lühikeste intervallidega omandatud koherentsete radari kujutiste aegridade või kogumite jaoks. Vaatlusintervalli nõuded SAR-anduri jaoks varieeruvad tundidest päevadeni (nt katastroofide seire), päevadest nädalateni (nt mulla niiskus, põllumajandus) kuni aastate ja aastakümneteni (nt vajumine, ökosüsteemid, kliimamuutused) (joonis 2.5). Üldises mõttes suureneb teabe otsimise usaldusväärsus koos andmetes saadaoleva infosisu kogusega, mis omakorda sõltub vaatluse pikkusest (Moreira jt, 2013).





**Joonis 2.5.** Vajalikud vaatlusintervallid Maa pinnal olevate dünaamiliste protsesside süstemaatiliseks jälgimiseks (Moreira jt, 2013)

Infosu suurenemist saab saavutada mitmel viisil, sealhulgas aegridade, ruumilise mitmekesisuse (interferomeetria, tomograafia), mitmekanalilise hankimise (polarimeetria, mitmekordne sagedus) ja signaali ribalaiuse (eraldusvõime) ning samuti ka kombinatsioonide abil. Iga rakendus esitab anduri omadustele ja vaatlusstsenaariumile siiski erineva nõude. Joonisel 2.6. on välja toodud võrdlus erinevate ajastute SAR piltide pakutavast infosist (Moreira jt, 2013).



**Joonis 2.6.** Parema geomeetrilise eraldusvõime (süsteemi ribalaius) ja mitmekanalilise töö (polarimeetria) abil saavutatud infosisu kasvu võrdlus. a) X-lainesagedusel kujutis 1 m eraldusvõimega (kosmoses paikneva X-lainesagedusel anduriga skaneeritud); b) ja c) 0,25 cm eraldusvõimega X-lainesagedusel kujutis vastavalt ilma ja koos täielikult polarimeetrilise skaneerimisrežiimiga. Kujutatud piirkond: Kaufbeuren, Saksamaa. Punktides b ja c olevad pildid on saadud DLR-i F-SAR-anduri abil (Moreira jt, 2013).

## **2.3. Tehisavaradari tehnikad**

### **2.3.1. Polarimeetria**

SAR polarimeetria tähendab signaali polarimeetria kasutamist radari rakendustes (Boerner, 2007). Polarimeetria põhineb inimese loodud ja looduslike peegeldajate polarimeetriliste omaduste mõõtmisel ja uurimisel (Moreira jt, 2013). Polarimeetria käsitleb polariseeritud (vektori) elektromagnetlainete olemust kogu sagedusspektris alates ultramadalatest sagedustest kuni kaug-ultraviolettkiirusteni. Alati, kui murdumisnäitajas (või läbilaskvuses, magnetiläbilaskvuses, juhtivuses) toimuvad järsud või järkjärgulised muutused, muutub kitsa sagedusega (ühesagedusliku) laine polarisatsiooniseisund ja elektromagnetiline vektorlaine polariseerub uuesti. Kui laine läbib muutuva murdumisnäitaja keskkonda või kui see tabab objekti, näiteks radari sihtmärki ja/või peegeldamispinda, ja see peegeldub; siis saab polariseerumiskontrolli rakendamisega saada iseloomulikke teavet peegeldava keha peegelduvuse, kuju ja orientatsiooni kohta (Boerner, 2007). Täieliku peegeldamise maatriksi mõõtmine võimaldab luua võimsa vaatlusruumi, mis on tundlik peegeldajate kuju, orientatsiooni ja dielektriliste omaduste suhtes, ning võimaldab välja töötada füüsilisi mudeleid sama lahutusvõimega esinevate peegeldamismehhanismide tuvastamiseks ja/või eraldamiseks. SAR polarimeetriat kasutatakse maa, lume, jää, ookeanide ja linnade uurimiseks (Moreira jt, 2013).

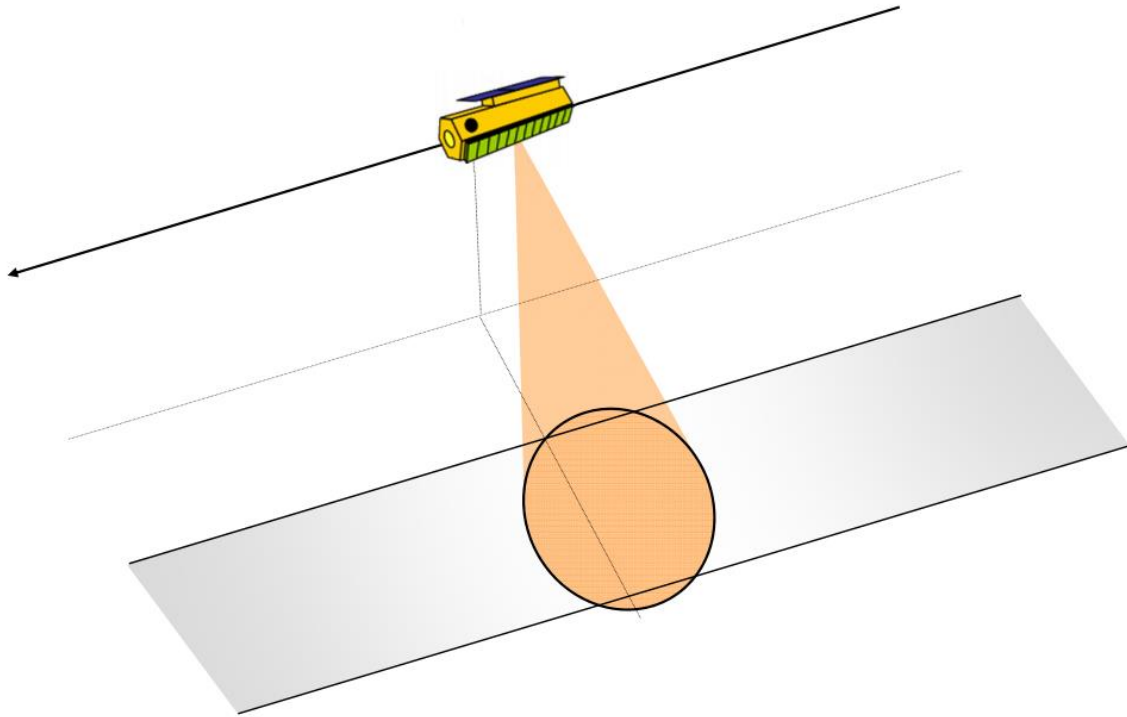
### **2.3.2. Interferomeetriline tehisavaradar**

InSAR ehk interferomeetriline SAR on raadioastronoomias mitme aastakümne jooksul välja töötatud tavapäraste SAR-i meetodite ja interferomeetriliste meetodite süntees (Rosen jt, 2000). Seni vaatasime sensori tuvastatud signaalide amplituude, et kujutada, kuidas erinevat tüüpi peegeldajad ja topograafia kuvatakse SAR kujutisena. SAR-i signaal koosneb amplituudist ja faasist. SAR interferomeetria puhul on oluline just signaali faas. Salvestatud signaali saab kirjeldada valemiga (2.1.) (Höser, 2018).

$$g = Ae^{-j\phi} = Ae^{-j\frac{4\pi}{\lambda}\rho}, (2.1.)$$

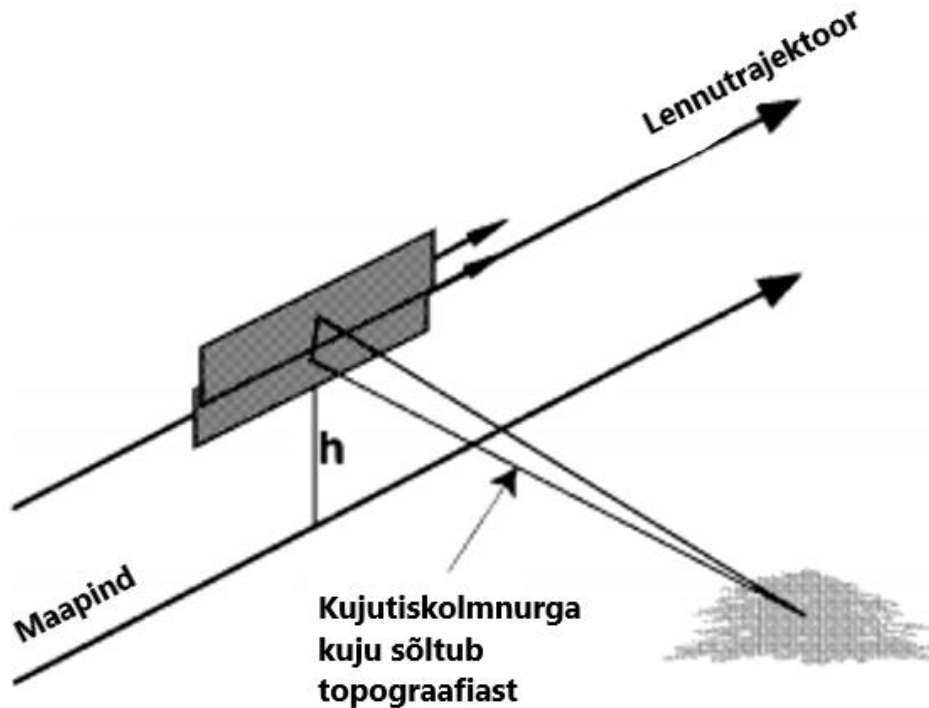
kus  $g$  on mõõdetud komplekssignaali,  $A$  on amplituud,  $j\phi$  salvestatud faas ja  $\rho$  on anduri ja peegeldaja vaheline kaldkaugus. Faasisignaali  $\phi$  tuvastamise mõistmiseks on hädavajalik mõista LOS (*Line Of Sight*) geomeetriat. See kirjeldab teed, mida elektromagnetiline signaal peab läbima kaks korda, et naasta teatud peegeldajast tagasi SAR süsteemi, kus see kõigepealt kiirati. See tähendab, et SAR süsteem tunneb faasisignaali väärtuse tõttu kaldkauguses peegeldaja asendi ära (Höser, 2018).

InSAR-i viimaste aastate arengud on tegelenud mõningate tavapäraste SAR-süsteemide piirangutega ja avanud seejärel täiesti uued rakendusvaldkonnad Maa kui terviksüsteemi teadusuuringutes. Tavapärane SAR mõõdab sihtmärgi asukohta ainult kahemõõtmelises koordinaatsüsteemis, kusjuures üks telg piki lennurada (*“along-track direction”*) ja teine telg sellega risti (*“cross-track direction”*) (joonis 2.7). Sihtkohad SAR-kujutisel on planeetriselise vaate suhtes moonutatud. Paljude rakenduste korral mõjutab see kõrgusest sõltuv moonutus kahjulikult kujutiste tõlgendamist. InSAR-meetodite väljatöötamine on võimaldanud mõõta objekti kolmemõõtmeliselt (Rosen jt, 2000).



**Joonis 2.7.** SAR-i kandev platvorm järgib murdjoonelist rada, mis on tuntud kui pikilennutrajektoori (“along-track”) või piki-asimuuti („*azimuth*”) suund. Radari antenn osutab küljele, skaneerides allpool asuvat maastikku (Younis, 2015).

Kui radariimpulsse edastatakse tavapärasest SAR-antennist, võtab peegeldusi vastu nii tavaline kui ka täiendav SAR-antenn. Kahe antenni signaalide ühtsel kombineerimisel saab iga kujutatava punkti jaoks moodustada interferomeetrilise faaside erinevuse vastuvõetud signaalide vahel (Rosen jt, 2000). Termin faas tähistab sensori konkreetse lainepikkuse mõõtmist vahemikus  $-1\pi$  kuni  $1\pi$  (Höser, 2018). Selle stsenaariumi korral on faaside erinevus sisuliselt seotud geomeetrilise tee pikkuse erinevusega mõõdistatava punktini, mis sõltub topograafiast. Teades interferomeetri geomeetriat, saab faaside erinevuse teisendada iga mõõdistatava punkti kõrguseks. Põhimõtteliselt annab faaside erinevus lisaks mõõdistatava punkti ehk „sihtmärgi” *along-track* ja *cross-track* asukohale ka kolmanda mõõtmise, et võimaldada sihtmärkide kolmemõõtmelise asukoha rekonstrueerimist (joonis 2.8) (Rosen jt, 2000).



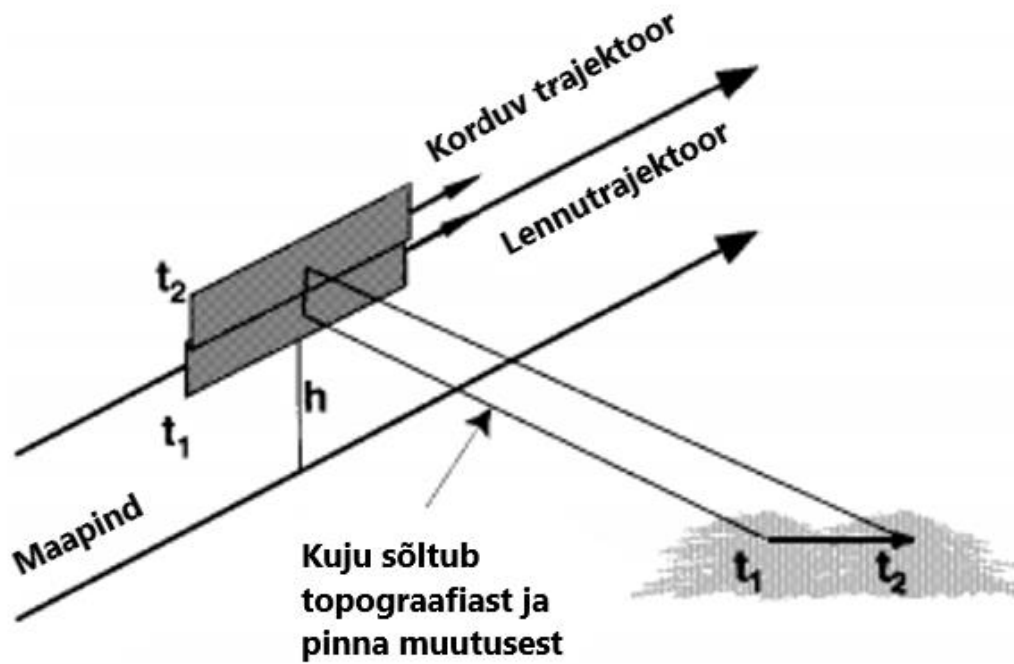
**Joonis 2.8.** Interferomeetriline SAR kasutab pinna skaneerimiseks kahte ava, mis on eraldatud “baasjoonega”. Iga mõõdistatava punkti avauste faaside erinevuse, baasjoone teadmise ning selle ulatusega saab teha järelduse kujutiskolmnurga täpse kuju kohta, et tuletada mõõdistatava punkti topograafiline kõrgus (Rosen jt, 2000)

Neid faaside erinevusi saab kasutada sihtmärgi nurga määramiseks interferomeetrilise SARi baasjoone suhtes. InSAR parallaksi mõõtmise täpsus on tavaliselt mõni millimeeter kuni sentimeeter, moodustades murdosa SAR-i lainepikkusest (Rosen jt, 2000).

### 2.3.3. Diferentsiaalne interferomeetriline tehisavaradar

Diferentsiaalse interferomeetrilise tehisavaradari ehk DinSAR-i puhul on interferomeetrilise kombinatsiooni „*cross-track*“ baasjooned harva ühesugused. Selle tõttu erineb nende kahe topograafiliste variatsioonide tundlikkus. Topograafilise paari faaside erinevused skaleeritakse nii, et need vastaksid topograafia-muutuste paari varieeruvuse sagedusele. Pärast skaleerimist

lahutatakse topograafiliste faaside erinevused üksteisest, mille käigus eemaldatakse topograafia (Rosen jt, 2000).



**Joonis 2.9.** Korduva trajektooriga interferomeeter sarnaneb „*along-track*“ interferomeetriga. Radar kordab oma trajektoori ja mõõdab vaatluste vahel toimunud kujutise faaside erinevuse põhjal pinna liikumist. Kui trajektoor ei kordu täpselt, on vajalik topograafiline faas liikumise eraldamiseks diferentsiaalse interferomeetria meetoditega eemaldada (Rosen jt, 2000).

Sarnaselt InSARiga kasutatakse ka SAR-i seadme suurt tundlikkust LOS (vaatevälja) sihilise kauguse mõõtmiseks, et tuvastada maapinna nihkeid (Moreira jt, 2013). Korduva satelliidi ülennu puhul ei kordu anduri trajektoor täpselt, seega hõlmavad interferomeetrilised ajaliselt eraldatud mõõtmised tavaliselt topograafia ja radiaalse liikumise või pinna nihutamise märke (Rosen jt, 2000).

Lähenemisviisi nende andmete töötlemiseks topograafia eemaldamise teel kiiruse või pinna nihkumise saamiseks nimetatakse tavaliselt diferentsiaalseks interferomeetriliseks SAR-ks. Selle lähenemisviisi korral (joonis 2.9) on kahe interferomeetrilise faasimõõtmise

moodustamiseks vaja vähemalt kolme kujutist: lihtsamal juhul eeldatakse, et üks kujutise paar sisaldab ainult topograafia mõju, teine paar aga mõõdab topograafiat ja muutusi (Rosen jt, 2000).

Vaatleme kahte SAR pilti, mis on tehtud erinevatel aegadel ja mis on kombineeritud interferogrammi loomiseks. Juhul kui baasjoon oleks null oleks võimalik tulemuseks saada interferogramm, mille faasiteave oleks seotud ainult LOS (vaatevälja) sihilise kauguse muutusega. Praktikas on siiski alati olemas kindel baasjoon, mis muudab interferogrammi tundlikuks ka mõõdistamisvälja topograafia suhtes. Välise kõrgusmudeli abil saab topograafilise teabe interferogrammist lahutada, mille tulemuseks on diferentsiaalne SAR-interferomeetriline mõõtmine. Selle meetodiga on võimalik tuvastada kahe skaneerimise vahelise ajavahemiku vältel toimunud väikeseid muutusi (nt vajumise tõttu) (Moreira jt, 2013).

DinSAR suudab vaatevälja nihke mõõtmisel saavutada täpsuse lainepikkuse murdosa suurusjärgus, muutudes seega võimsaks tööriistaks suurte alade deformatsioonide jälgimisel (Moreira jt, 2013). Selle kaugseire tehnika oluline eelis on see, et see annab tervikliku ülevaate tuvastatud liikumisest kogu mõjutatud piirkonnas (Rosen jt, 2000). Sarnaselt InSAR-iga tuleb absoluutse nihketulemuse saamiseks diferentsiaalfaas lahti pakkida ja siduda teadaoleva väärtusega (Moreira jt, 2013). Selleks on vaja maapealseid mõõtmisi teatud arvul kohtades (nt GPS-i püsijaamad) (Rosen jt, 2000).

Siiski piiravad selle lähenemisviisi toimimist mitu aspekti. Esiteks peab välise kõrgusmudeli täpsus olema samas suurusjärgus või parem kui interferomeetrilise baasjoone faasitundlikkus. Samuti tuleb arvestada ajalise dekorrelatsiooni ja levimis keskkonna variatsioonide tõttu tekkiva faasimüraga. Faasimüra puhul on tegemist signaali atmosfäärilise viivituse tagajärjega, mis on peamiselt tingitud veeauru sisaldusest troposfääris. Viivitus on suurusjärgus 2–4 meetrit, kuid selle kohalik skaala võib olla suurusjärgus kuni 1 cm / km või rohkem, piirates seega tavapärase diferentsiaalse SAR-i interferomeetrilise lähenemise täpsust ja pakkudes huvi ainult juhtudel, kus nihked on sellest väärtusest suuremad (Moreira jt, 2013).



#### 2.3.4. Püsipeegeldajate interferomeetriline tehisavaradar

Püsipeegeldajatega interferomeetria (PSI ehk *Persistent scatterer InSAR*) on interferomeetria haru, mis kasutab pika aja (aastate) jooksul tugeva radari tagasipeegeldusega punktpeegeldajaid, et saada punkti faasiajalugu mingi ajavahemiku jooksul (Interferometry 2021).

PS-InSAR on täpne ja tõhus meetod interferomeetriliste kombinatsioonide topograafilise ja nihkesignaali ühiseks hindamiseks. Aegridade InSAR-analüüsi abil, kasutades püsipeegeldajate (PS) tehnikaid, on eesmärgiks topograafilise ja nihkesignaali ühine hindamine mitmetest interferomeetrilistest kombinatsioonidest (Marinkovic, Leijen, Ketelaar & Hanssen, 2005). Püsipeegeldajad võivad olla väikesed, tavaliselt inimese poolt loodud objektid, mille peegeldused jäävad aja jooksul väga korreleeruvaks (Interferometry 2021). Tavapäraseid satelliidi korduva ülelennu interferomeetrilisi mõõtmisi saab kasutada vajumisnähtuste jälgimiseks suure täpsusega. See metoodika töötati välja enamasti külgnevate faasivaatluste jaoks, võimaldades ruumilise sidususe hindamist ja 2D-faasi lahtipakkimist. Kahjuks toimub paljudes maailma piirkondades peegeldamistunnuste täielik ajaline dekorrelatsioon päevade ja kuude jooksul. Sellistes oludes säilitavad sidusust ainult linnapiirkonnad ja isoleeritud stabiilsed peegeldajad. Sellisel põhjusel töötati välja selliste punktide ehk püsipeegeldajate (PS) tuvastamise ja analüüsimise metoodika, kasutades konkreetse ala kohta paljusid (30 või enam) SAR-i kujutisi (Ferretti, Prati & Rocca, 2000). See lähenemine võimaldab sidususe hindamist, kasutades ajalist pikslipõhist hindamist (Hanssen, 2003). Väiksem kujutiste arv põhjustab tavaliselt selliseid probleeme nagu potentsiaalse püsipeegeldaja tuvastamine, atmosfäärisignaali vähendamine, topograafia ja nihke eraldamine ning faaside ebaselguse hindamine (Marinkovic jt, 2005). InSARi hiljutised arengud on näidanud, et maa-alal ebahühtlaselt jaotunud püsipeegeldajatena (PS) tuntud punktide mõõtmisi saab kasutada suure täpsusega deformatsiooniparameetrite saamiseks (Ferretti jt, 2000, 2001). Püsipeegeldajate (PS) tehnika on välja töötatud eraldatud koherentsete pikslite tuvastamiseks ja atmosfääri viivitusprobleemide lahendamiseks, selleks on aga vaja suurt hulka pilte ( $> 30$ ) ning pikslite kaupa põhinevat hindamist (Ferretti jt, 2000, 2001). Punktisihtmärgid SAR kujutistel mida ajaline dekorrelatsioon ei mõjuta, tuvastatakse nende amplituudide statistilise analüüsi abil. Topograafia, deformatsiooni ja atmosfääri panust saab hinnata, kasutades hoolikalt ära nende erinevat ajalisi-ruumilist käitumist (Hanssen, 2003).

Näiteks aeglaselt liikuvate (suurusjärgus dm/aastas) maalihete jälgimiseks on kasutatud traditsioonilist diferentsiaalset InSAR-meetodit, samas kui dünaamilise InSAR-i metoodika põhineb SAR-i andmehulga, näiteks väikeste baasjoonte alamhulkade ehk *small baseline subsets* (SBAS) analüüsil. InSAR ja püsipeegeldajate interferomeetria (PSI) meetodid võimaldavad tuvastada äärmiselt aeglaseid liikumisi (Aslan jt, 2020). PS-i deformatsioonimõõtmiste täpsus on millimeetri vahemikus, lineaarse deformatsiooni korral isegi parem kui 1 mm / aastas. See täpsus põhineb peamiselt saadaolevate mõõtmiste arvul, ajalistel ja ruumilistel baasjoontel. Selle hinnangu usaldusväärsus põhineb eeldusel, et täisarvulise faasi ebaselgus piksli kohta ajas on lahendatud, et atmosfäärisignaali mõju on hinnatud piisava täpsusega ja et deformatsioonisignaali saab ligikaudselt võrrelda mudeli „trend pluss signaal” abil (Hanssen, 2003). Püsipeegeldajaga interferomeetria (PS-InSAR) on näidanud potentsiaali mitmesuguste ohusündmuste stsenaariumite ja nende arengu ajalis-ruumilisel jälgimisel (Beladam, Balz, Mohamadi & Abdalhak, 2019). Hoolimata selle edukusest maapinna ja ehitiste dünaamika uuringutes, on dünaamilistel InSAR-meetoditel endiselt teatud piirangud, sealhulgas taimestiku ja mullapinna muutuse tõttu tekkinud ajaline dekorrelatsioon, lahtipakkimisvead, kõrgusmudeli vead ja atmosfäärist tulenevad vead. Lisaks on mitmed uuringud näidanud interferomeetriliste paaride valiku mõju InSARi nihke hinnangutele (Aslan jt, 2020).

## 2.4. Tehisvaradari kasutusvaldkonnad

Tehisavaradarit mõõtmist võib kasutada paljudel eesmärkidel. Järgnevalt on välja toodud mõned tehisavaradari kasutusvaldkonnad (Moreira, 2013):

- topograafia (DEM-i genereerimine koos interferomeetriaga)
- okeanograafia (laine spektrid, tuule kiirus, ookeani hoovused)
- liustikud (lume niiskus, lumevee ekvivalent, liustike seire)
- põllumajandus (põllukultuuride klassifikatsioon ja seire, mulla niiskus)
- geoloogia (maastiku eristamine, maapinna skaneerimine)
- metsandus (metsa kõrgus, biomass, metsade hävitamine)

- liikuva sihtmärgi tuvastamine ehk Moving Target Indication (MTI)
- vulkaanide ja maavärinate seire (diferentsiaalne interferomeetria)
- keskkonnaseire (naftareostused, üleujutused, linnakasv, globaalsed muutused)
- sõjaline järelevalve ja luure (strateegiline poliitika, taktikaline hindamine)

## 2.5. Interferomeetrilise tehisavaradari veaallikad

Faasimõõtmise täpsust piirab oluliselt nn interferomeetrilise sidususe väärtus, mis kirjeldab kahe radaripildi korrelatsiooniastet. Praktikas aitavad sidususe vähenemisele kaasa mitmed tegurid. Sidususe kadu võib põhjustada interferogrammis üsna suuri faasivigu. Faasimüra leevendamiseks arvutatakse kompleksne interferogramm enne faasiväärtuste tuletamist sageli lokaalselt. Seda keskmise arvutamist tähistatakse tavaliselt terminiga „*multi-looking*“. Teine oluline tegur on ajaline dekorrelatsioon, mis kirjeldab stseeni mikrostruktuuri ja läbilaskvuse muutusi kahe ajaliselt eraldatud pildi omandamise vahel. Ajalise dekorrelatsiooni võivad põhjustada näiteks väikesed vastastikused nihked peegeldajate vahel. Olulisteks dekorrelatsiooniallikateks on ka geomeetriline baasjoon ja mahu dekorrelatsioon. Üheks peamiseks mõjutajaks on siiski vastuvõtja müra. Eeldades mõlema vastuvõtja jaoks ühesugust müra võimsust, saadakse vastav koherentsuskadu sellest, kus SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) on iga vastuvõtjaga seotud signaali ja müra suhe (Moreira jt, 2013).

Interferomeetrilist faasi mõjutavad neli aspekti: 1) topograafilised moonutused, mis tulenevad kahe satelliidi ülelennu veidi erinevast vaatenurgast (t), 2) atmosfääri mõjud, mis tulenevad niiskust kandva kihi lainepikkuste moonutustest, 3) radari sihtmärgi vahemiku nihe, 4) müra (dekorrelatsiooniefektid). Ühe SAR-interferogrammi abil on raske eemaldada kõiki faasi mõjutavaid tegureid, peale radari sihtmärgi vahemiku nihkumise (InSAR AT A..., 2021).

Mõõtmise kvaliteeti mõjutavad kõige olulisemad tegurid (InSAR AT A..., 2021) on:

- Mõõtepunktide ruumiline tihedus (mida väiksem on tihedus, seda suurem on viga)
- radari sihtmärkide kvaliteet (signaali ja müra suhte tasemed)
- Atmosfääritingimused mõõdistamise ajal

- Mõõtepunkti ja võrdlusaluse ehk referentsi (REF) vaheline kaugus
- Mõõtmiste arv ja ajaline jaotus

### 3. SENTINEL-1 MISSIOON

SENTINEL-1 on satelliitradari missioon, mis pakub pidevaid ilmastikust ja päikesevalgusest sõltumatuid radarkujutisi. Sentinel-1 töötab C-lainesagedusel ning pakub suurt usaldusväärsust, geograafilist ulatust ja kiiret andmete levitamist, et toetada operatiivrakendusi mereseire, maaseire ja hädaabiteenuste prioriteetsetes valdkondades. SENTINEL-1 skaneerib kõrge eraldusvõimega potentsiaalselt kõiki eraldiseisvaid maismaa-, rannikualasid ja laevateid Euroopa vetes ning korrapäraste ajavahemike järel ka maailmameresid. Sentinel-1 missioonil on kaks põhilist töörežiimi, esmane töörežiim maismaa vaatlemiseks ning teine režiim avatud ookeani vaatlemiseks (Overview, 2021).

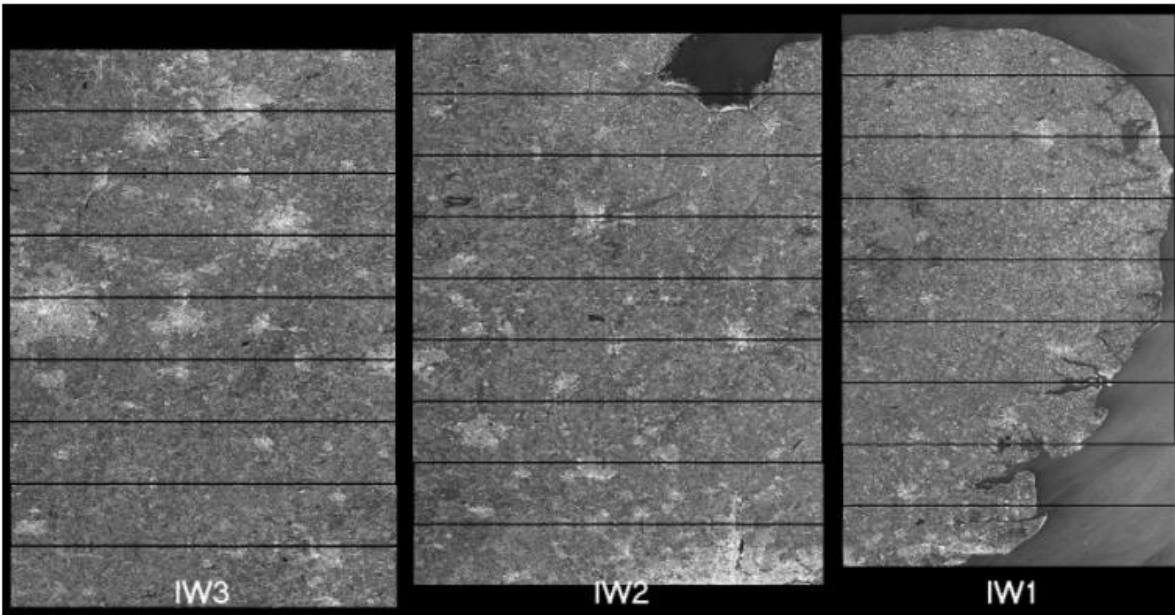
Tehisavaradari (SAR) missioon SENTINEL-1 hangib andmeid neljas eksklusiivses režiimis (Overview, 2021):

- *Stripmap* (SM) - tavaline SAR-i ribakaardi skaneerimisrežiim, kus mõõtmisvihku skaneeritakse pideva impulsside järjestusega, samal ajal kui antennikiir asetseb fikseeritud asimuudi ja vaatenurga all.
- *Interferometric Wide swath* ehk Interferomeetriline lai vihk (IW) - andmed saadakse kolme vihuga, kasutades maastikuvaatlust koos progresseeruva skaneerimise SAR ehk *Progressive Scanning SAR* (TOPSAR) pildi tehnikaga. IW-režiimis sünkroniseeritakse impulspaketid, et tagada interferomeetriliste paaride joondamine. IW on SENTINEL-1 peamine töörežiim maismaal (Overview, 2021) ning see vastab enamusele teenusenõuetele. See omandab andmeid 250 km vihuga 5x20 m ruumilise eraldusvõimega (Interferometric Wide Swath, 2021).
- *Extra Wide swath* ehk Ekstra lai vihk (EW) - andmed saadakse viie vihuga, kasutades TOPSAR-pilditehnikat. EW-režiim tagab ruumilise eraldusvõime arvelt väga suure laiusuga vihu.
- *Wave* ehk Laine (WV) - andmeid kogutakse väikestes ribakaardistseenides, mida nimetatakse vinjettideks ja mis asuvad regulaarsete 100-kilomeetrise vahedega mööda vaatlusrada. Vinjetid omandatakse vaheldumisi, omandades üks vinjett lähedase

langemisnurga all, järgmine vinjett aga kaugema langemisnurga all. WV on SENTINEL-1 töörežiim avatud ookeani kohal.

ESA (*European Space Agency*) SENTINEL-1 andmetooted hõlmavad järgmisiprodukte (Overview, 2021):

- 0-taseme toorandmed (spetsiifiliseks kasutamiseks)
- Töödeldud 1. taseme *Single Look Complex* (SLC) andmed, mis sisaldavad keerukaid kujutisi amplituudi ja faasiga (süsteemne jaotamine piirdub konkreetsete piirkondadega). IW SLC tooted (joonis 3.1.) sisaldavad ühte kujutist alamvihuna ja ühte polariseerimiskanalit, kokku kolm (üks polariseerimine) või kuus (kahekordne polarisatsioon) pilti IW-tootes. Iga alamkaardipilt koosneb impulsipakettide seeriast, kus iga impulsipakett on töödeldud eraldi SLC-pildina. Individuaalselt fokuseeritud keerulised sarivõtte kujutised on asimuudi-aja järjekorras üheainsa alamvihuga kujutise vahel, mille vahel on musta täidisega piiritlus. GRD-toodetes ette nähtud maapinna pideva katte tagamiseks on külgnivate impulsipakettide ja alamvihkude vahel piisav kattuvus. Kõigi alamvihkude kõigi impulsipakettide kujutised analüüsitakse uuesti ühise pikslite ruudustiku vahega ja asimuudiga, säilitades faasiinfo (Interferometric Wide Swath, 2021). 1. taseme *Single Look Complex* (SLC) tooted koosnevad fokuseeritud SAR-i andmetest, georefereeritud kasutatud satelliidi orbiidi- ja hoiatusandmete põhjal ning esitatud kaldgeomeetrias. Kaldkaugus on radari loodusliku kauguse vaatluskoordinaat, mis on määratletud kui vaatenurk radarist iga peegeldava objektini. Produktid on null-Doppleri orientatsioonis, kus iga pikslirida tähistab punkte mööda satelliidi liikumissuunga risti olevat joont (Level 1, 2021).
- *Ground Range Detected* (GRD) 1. taseme andmed ainult mitme vaatega intensiivsusega (süsteemaaliselt jaotatud) (Overview, 2021).
- 2. taseme ookeani (OCN) andmed ookeani geofüüsikaliste parameetrite kohta (süsteemaaliselt jaotatud) (Overview, 2021).



**Joonis 3.1.** IW SLC impulsipaketid ja alamvihud (Interferometric Wide Swath, 2021)

Sentinel-1 eelised ilmnevad neljast aspektist: laiaulatuslik katvus, suur ruumiline eraldusvõime, lühem korduslennu aeg ja orbiitide täpne kontroll. Sentinel-1 orbiidi korduvused mahuvad väikese kujuteldavad toru sisse, mille läbimõõt on suurusjärgus 100 meetrit. Lühike baasjoon soosib järgmises protsessis väga sidusate interferogrammide loomist (Qin, Perissin & Milillo, 2017).

## 4. METOODIKA JA LÄHTEANDMED

### 4.1.Lähteandmed

Käesolevas töös on InSAR kaugseire meetodil maapinna deformatsioonid määratud rannikul oleva püsijaama läheduses. Maapinna deformatsioonid on määratud Pärnu maakonnas, kuid täpsemalt on uuritud Audru GNSS püsijaama ümbruses esinevaid deformatsioone. Töötluseks kasutati kokku 66 satelliitpilti. Satelliitpildid on tellitud Euroopa Kosmoseagentuuri poolt hallatud Copernicus keskkonnast (joonis 5.1).



**Joonis 5.1.** Copernicus keskkonna ekraanikuva

Uuritava GNSS püsijaama ümbruses on tellitud pildid kuu ajase vahemikuga aastatel 2015-2021. Kõik kasutatud satelliitpildid on pärit Sentinel-1A missioonilt, laskuva orbiidiga, SLC ja IW tüüpi ning VV polarisatsiooniga (joonis 5.2).



☑ **Mission: Sentinel-1**

Satellite Platform	Product Type
<input type="text" value="S1A_"/> ▼	<input type="text" value="SLC"/> ▼
Polarisation	Sensor Mode
<input type="text" value="VV"/> ▼	<input type="text" value="IW"/> ▼
Relative Orbit Number (from 1 to 175)	
<input type="text"/>	

**Joonis 5.2.** Tellitud piltide parameetrite valik Copernicus keskkonnas

## 4.2. Metoodika

Sentinel-1 SAR piltide töötlemiseks on kasutatud ESA (*European Space Agency*) loodud arvutiprogrammi SNAP. Töötlemiseks on vajalik juhtpilt ning alampilt. Töötlemisel on vaja piltide paari, mille puhul juhtpildiks on alati sama pilt ning alampilt muutub iga töötlemisega. Antud töö juures on iga püsijaama ümbruses olevate piltide puhul juhtpildiks alati 2015. aasta 13. jaanuari pilt ning alampiltideks 2015. aasta veebruar, märts, aprill..., 2016. aasta jaanuar, veebruar jne.

Satelliitpiltide töötlemise järjekord on järgmine:

- Andmete registreerimine
- Interferogrammi moodustamine ja sidususe hindamine
- Geokodeerimine ja andmete eksportimine
- Tulemuste visualiseerimine ning statistiliste näitajate arvutamine

#### **4.2.1. Andmete registreerimine**

Esiteks loetakse töödeldavate piltide paar programmi SNAP. Seejärel tükeldatakse mõlemad pildid vähemateks alamvihkudeks laiali. See on vajalik selleks, et andmete hulka vähendada ning töötlemise kiirust suurendada.

Teiseks lisatakse piltidele täpse orbiidi korrektsioon, mis sisaldab teavet satelliidi asukoha kohta SAR-andmete hankimisel.

Viimaseks lisatakse SNAP programmi poolt alla laaditud digitaalne kõrguse mudel (DEM) andmetele. Antud töötlemise juures on kasutatud SRTM 3Sec kõrgusmudelit.

#### **4.2.2. Interferogrammi moodustamine ja sidususe hindamine**

Interferogramm moodustatakse juhtpildi ristkorrutamisel alampildiga. Mõlema pildi amplituud korrutatakse, mille juures faas tähistab faaside erinevust kahe pildi vahel.

Lisaks interferomeetrilisele faasile hinnatakse koherentsust (sidusust) juht- ja alampildi vahel. Põhimõtteliselt näitab see, kas piltidel on tugev sarnasus ja kas neid saab seetõttu kasutada interferomeetriliseks töötlemiseks. Koherentsuse kadumine võib anda halbu interferomeetrilisi tulemusi ja selle põhjustavad ajalised (taimestiku ja veekogude kohal), geomeetrilised (orbiidi metaandmete vead või ebatäpsused) ja mahuline dekorrelatsioon (mahukate struktuuride, näiteks keeruka taimestiku või kuivade pindade võimalikud hajumismehhanismid).

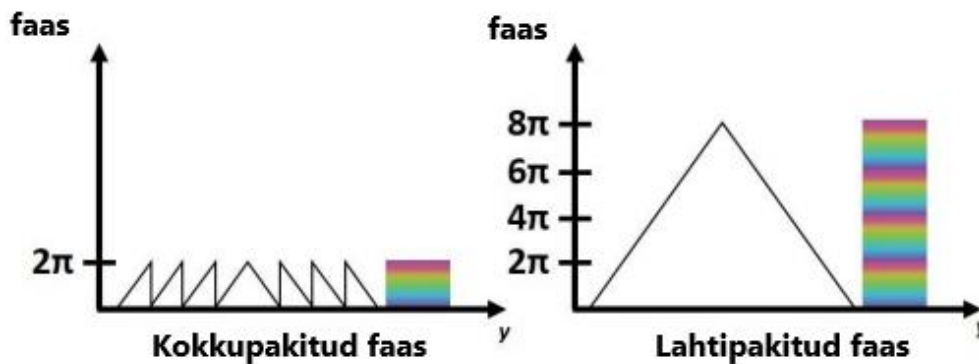
Sidusus arvutatakse eraldi rasterribana ja see näitab, kui sarnane on iga piksel alam- ja juhtpiltide vahel skaalal 0–1. Suure sidususega alad tunduvad heledad. Halva sidususega piirkonnad on pimedad.

Interferogrammi loomisel eemaldatakse tasapinnalise maa faas (interferomeetrilises signaalis esinev faas referentspinna kumeruse tõttu), topograafiline faas ning lisatakse sidususe hinnang (Braun ja Veci, 2020).

Järgmiseks eemaldatakse pildil olevate impulspakettide vahel olevad jooned (*Deburst*).

Selleks, et interferomeetrilise faasi kvaliteeti tõsta ning välja jätta erinevad töötlusvead kasutatakse spetsiaalseid faasifiltreid. Antud töö juures on kasutatud Goldsteini filtrit, mis parandab signaali-müra suhet.

Kuna interferogrammis on faas ebamäärane, tuleb see topograafilise kõrgusega seostamiseks kõigepealt lahti pakkida. Faasi lahtipakkimine (joonis 5.3) lahendab selle ebamäärasuse, integreerides naaberpikslite faaside erinevuse. Pärast ebamäärase täisarvuliste kõrguste kustutamist, annab tasandatud interferogrammi kahe punkti faasimuutus mõõtmise tegeliku kõrguse variatsiooni (Braun ja Veci, 2020).



**Joonis 5.3.** Faasi lahtipakkimine (Braun ja Veci, 2020).

Faasi lahti pakkimiseks on kasutatud programmi Snaphu.

Tulemusena saadakse lahti pakitud faas, mis pole veel meetermõõdustikus. Radiaaniühikute teisendamiseks absoluutseteks niheteks kasutatakse tööriista *Phase to Displacement*, mis teisendab faasi pinna muutusteks meetrites.

### 4.2.3. Geokodeerimine

Geokodeerimine seob pildi valitud koordinaatide süsteemiga. Maastiku geokodeerimine hõlmab digitaalse kõrguse mudeli (DEM) kasutamist, et korrigeerida loomulikke geomeetrilisi moonutusi.

### 4.2.4. Tulemuste visualiseerimine, statistiliste näitajate arvutamine ja andmete eksportimine

Tulemusena on töötlusega saadud nihete kaart iga kujutise paari kohta. Järgmiseks on iga uuritud aasta nihete kaardid tööriista *Create Stack* abil ühte produkti koondatud. Lõpp-produktina on programmi Google Earth Pro abil visualiseeritud maapinna nihked Pärnu maakonnas ning graafiliselt aastate lõikes nihete stabiilsus ning töödeldud satelliitkujutiste koherentsuse näitajad. Mida suurem on koherentsus näitaja, seda usaldusväärsemad on tulemused. Tulemuste referentsiks on võetud 2015 aasta jaanuari satelliitpildilt töötlemise käigus saadud nihe. Lisaks on tööriista *Stack Averaging* abil välja toodud ka aastate lõikes Pärnu maakonnas esinevate nihete statistilised näitajad (aritmeetiline keskmine, miinimum, maksimum ning standardhälve). Standardhälbe arvutamiseks on kasutatud valemit 4.1. (Ruus 2011):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (4.1.)$$

kus  $\sigma$  – standardhälve

$x$  – mõõtmistulemuse väärtus

$\bar{x}$  – keskmine mõõtmistulemus

$n$  – mõõtmiste arv

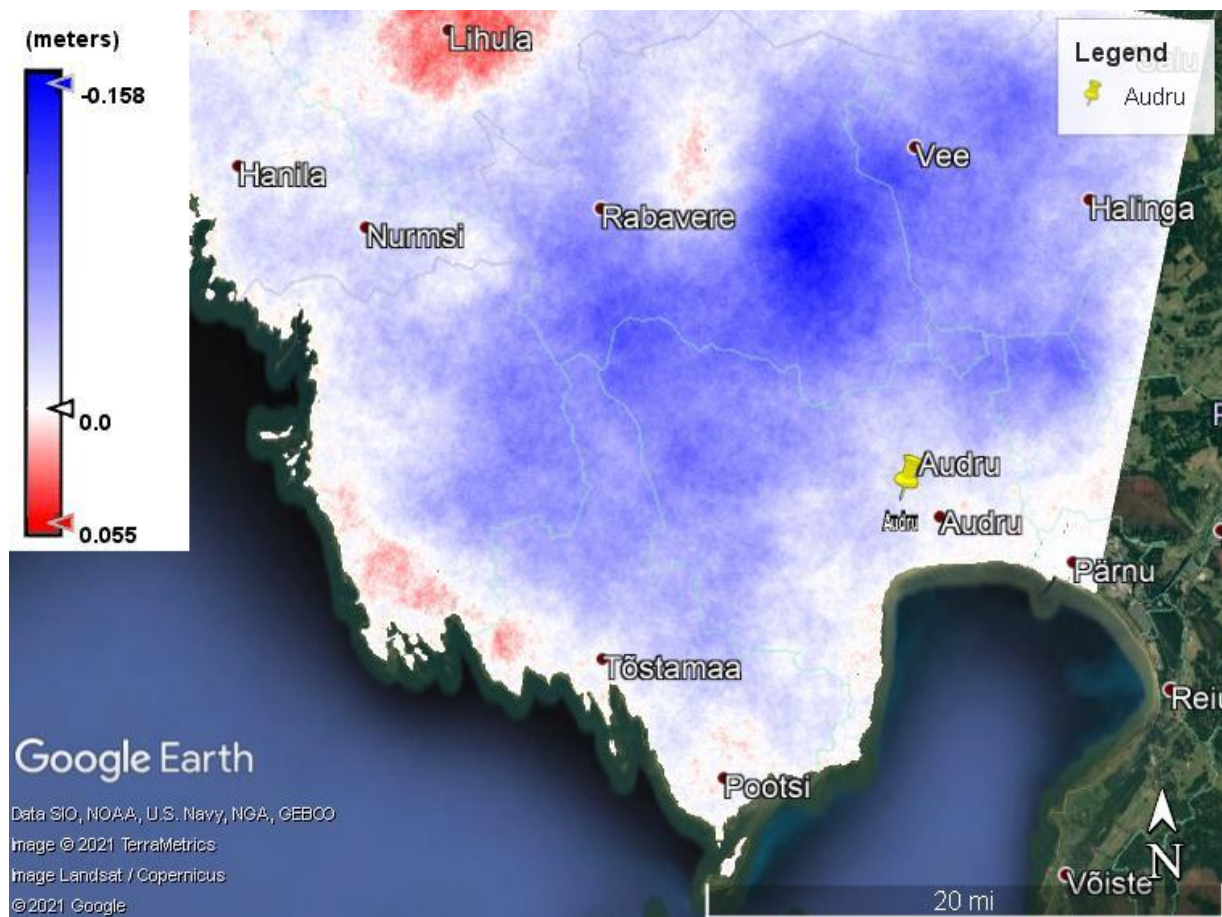
Standardhälve iseloomustab vastuste hajuvust keskmise ümber. Kui standardhälve on suur, siis on tulemused enamasti keskmisest kaugel. Kui standardhälve on väike, siis on tulemused keskmise lähedal.

## **5. TÖÖ TULEMUSED JA ARUTELU**

### **5.1. 2015. aasta tulemused**

Antud peatükis on välja toodud tulemused 2015. aasta nihetest.

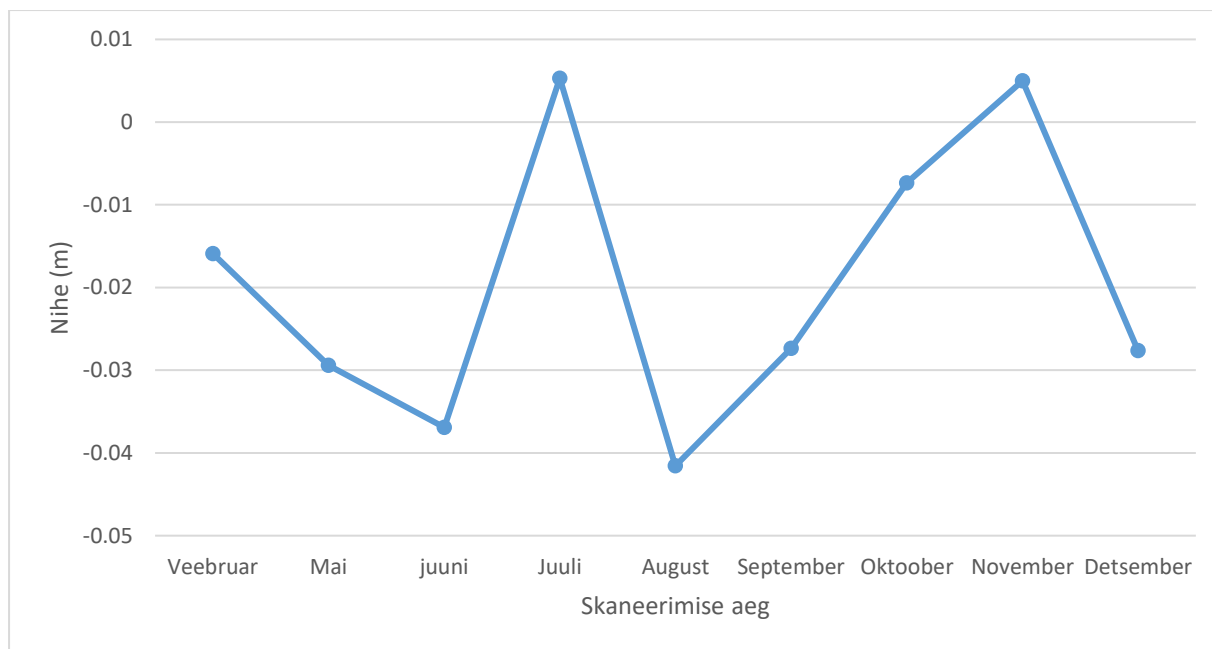
Joonise 6.1 põhjal on näha, et aastal 2015 on maapind pigem vajunud. Maapinna tõusu on esinenud Lihula piirkonnas ning veidi ka rannikul. Pärnu linna lähedal rannikul on nihked pigem nullilähedased. Kui vaadata 2015 aasta statistilisi näitajaid Audru püsijaama ümbruses (tabel 6.1), siis on keskmine maapinna nihe jäänud -2 cm juurde. Miinimumiks on saadud -4 cm ning maksimumiks 0.5 cm. Standardhälbeks on saadud  $\pm 1,6$  cm. Joonisel 6.2 on näha nihked aasta lõikes 2015 aasta jaanuari nihke suhtes. Graafikult on näha, et veebruarist juunini on maapind olnud vajumissuunas ning juuli kuus on esinenud maapinna vahelduv kerkimine ning vajumine. Augustist novembrini on toimunud stabiilselt maapinna vajumine vähenenud ning detsembris jälle suurenenud. Joonisel 6.3 on välja toodud koherentsusnäitaja. Suure osa tulemuste juures on koherentsusnäitaja püsinud 0,4 lähedal. Erandiks on olnud juuni kuu, kus tulemuste juures on näitaja olnud 0,1 lähedal.



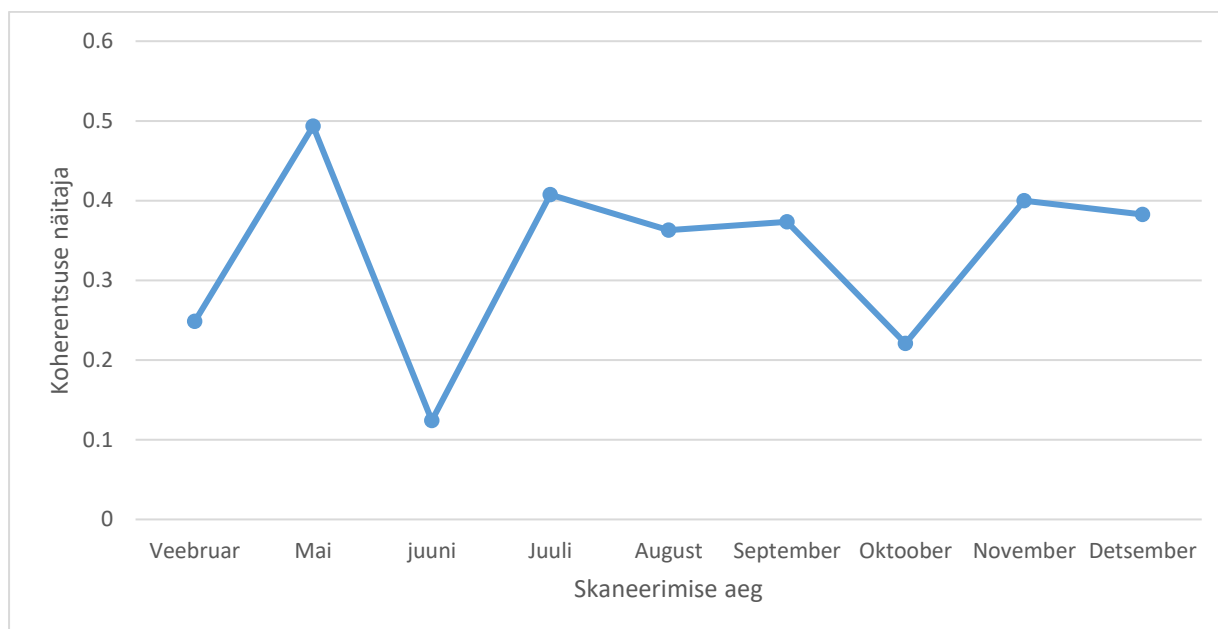
**Joonis 6.1.** Keskmised maapinna LOS nihked Pärnu maakonnas 2015. aastal 2015 aasta jaanuari suhtes

**Tabel 6.1.** Maapinna LOS nihete statistilised näitajad Audru püsijaama ümbruses 2015. aastal 2015 aasta jaanuari suhtes

Keskmine (m)	Miinimum (m)	Maksimum (m)	Standardhälve ( $\pm m$ )
-0.020	-0.042	0.005	0.016



**Joonis 6.2.** Audru püsijaama LOS nihked aastal 2015



**Joonis 6.3.** Audru püsijaama koherentsuse näitajad 2015. aastal

Üldiselt on näha, et aastal 2015 on maapind pigem vajunud. Maapinna tõusu on esinenud Lihula piirkonnas ning veidi ka rannikul. Pärnu linna lähedal rannikul on nihked pigem nullilähedased.

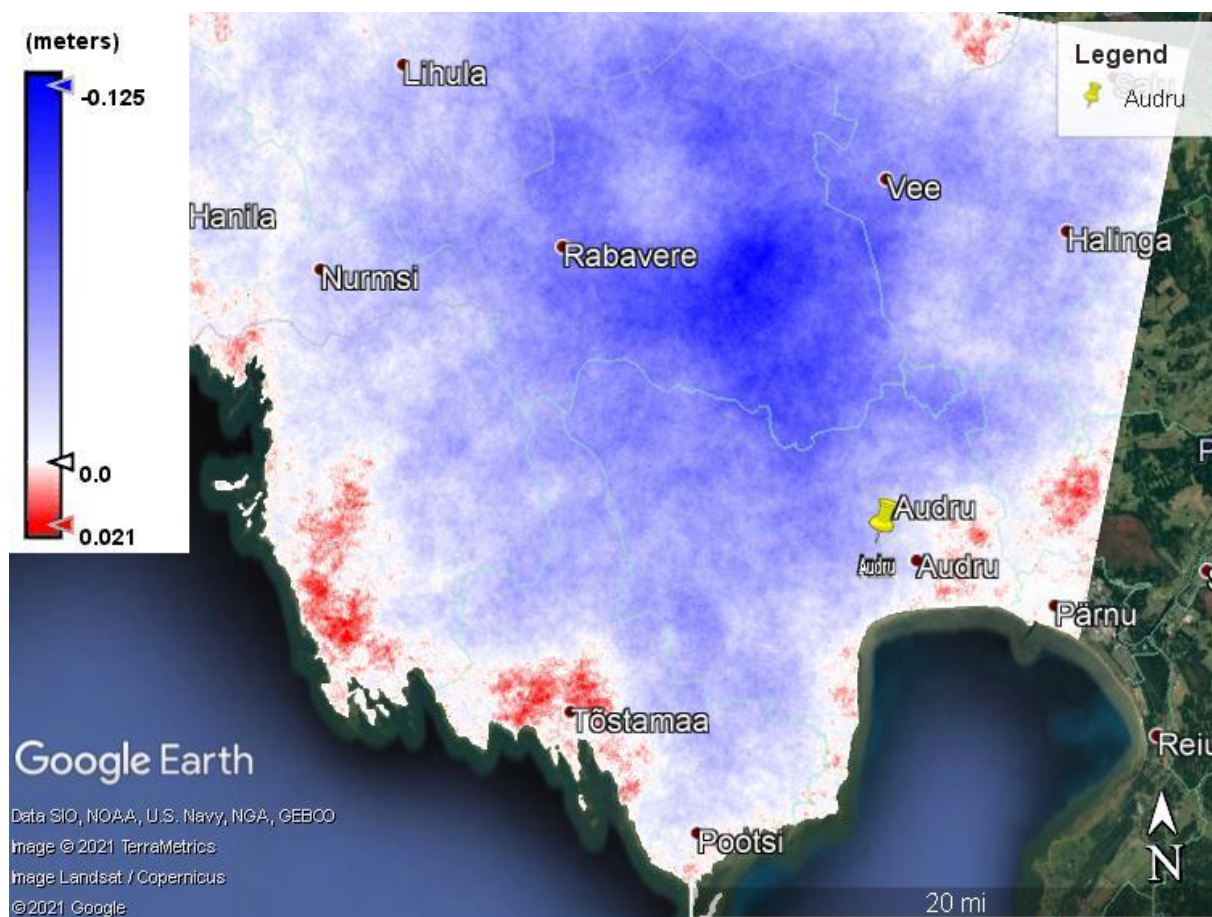
Referentspinnaks, mille suhtes on kõik nihked arvutatud on kasutatud 2015. aasta 13. jaanuari satelliitpilti.

## **5.2. 2016. aasta tulemused**

Antud peatükis on välja toodud tulemused 2016. aasta nihetest.

Tulemuste põhjal on kõige suurem vajumine olnud Rabavere lähedal umbes 12,5 cm ning suurim kerkimine 2 cm (joonis 6.4.). Kui jälgida maapinna nihete statistilisi näitajaid (tabel 2) Audru püsijaama ümbruses siis on saadud keskmiseks -3,6 cm ning miinumiks ja maksimumiks vastavalt -7,7 ja 1,2 cm. Standardhälveks on saadud  $\pm 2,8$  cm (tabel 6.2). Maapinna nihete aegrea (joonis 6.5.) põhjal on näha, et 2016. aastal on Audru püsijaama ümbruses aasta alguses esinenud väike maapinna kerkimine, ülejäänud aastal on toimunud maapinna vajumine. Veebruarist juunini on toimunud järsem vajumine ning ülejäänud aasta jooksul on vajumine olnud stabiilsem. Koherentsuse (joonis 6.6.) osas on toimunud tugev kõikumine, näitaja on jäänud 0,1 ja 0,45 vahele.

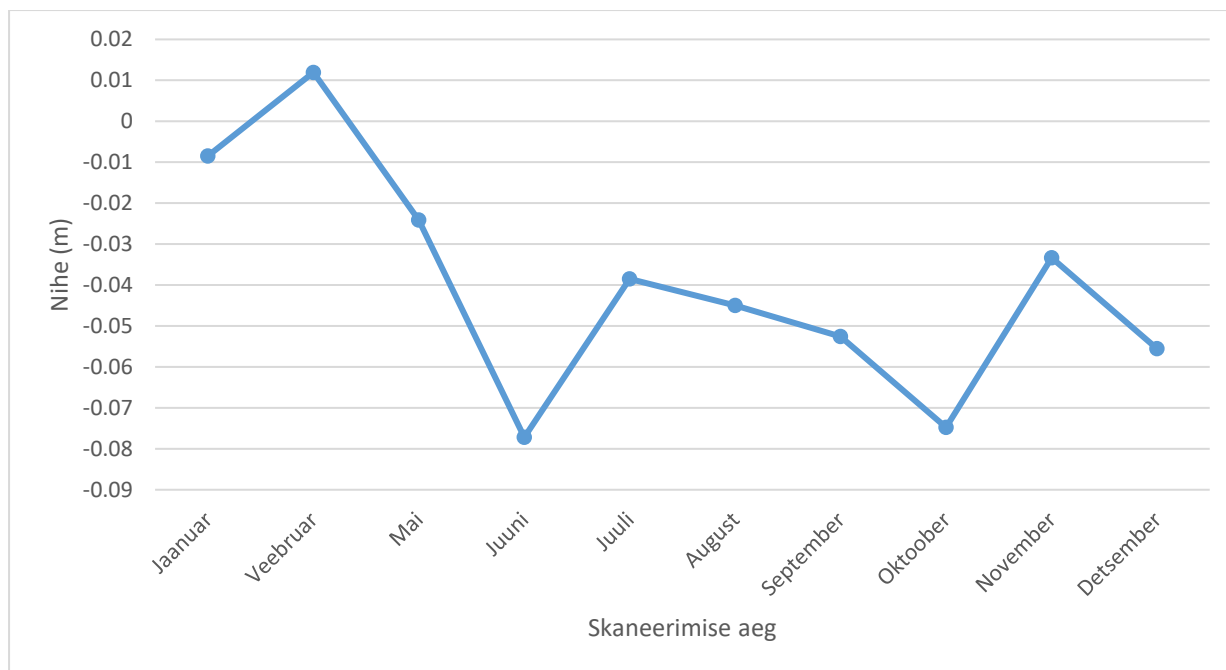




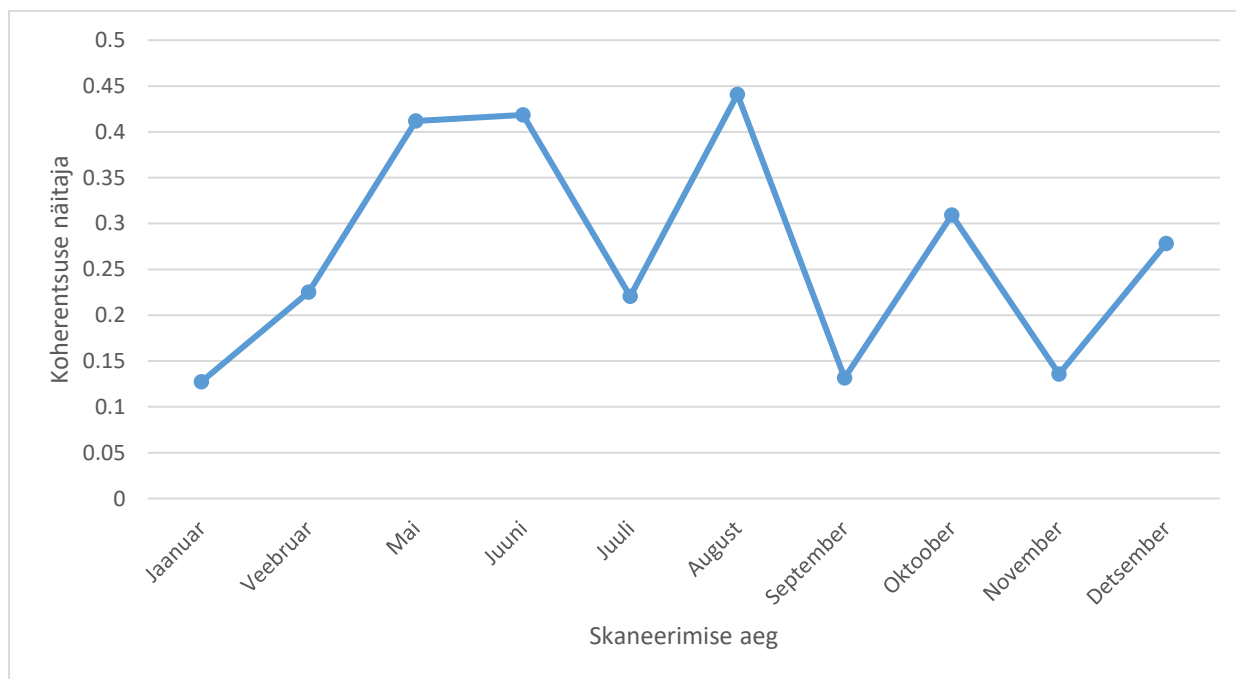
**Joonis 6.4.** Keskmised maapinna LOS nihked Pärnu maakonnas 2016. aastal 2015 aasta jaanuari suhtes

**Tabel 6.2.** Maapinna LOS nihete statistilised näitajad Audru püsijaama ümbruses 2016. aastal 2015 aasta jaanuari suhtes

Keskmine (m)	Miinimum (m)	Maksimum (m)	Standardhälve ( $\pm$ m)
-0.036	-0.077	0.012	0.028



**Joonis 6.5.** Audru püsijaama LOS nihked aastal 2016



**Joonis 6.6.** Audru püsijaama koherentsuse näitajad 2016. aastal

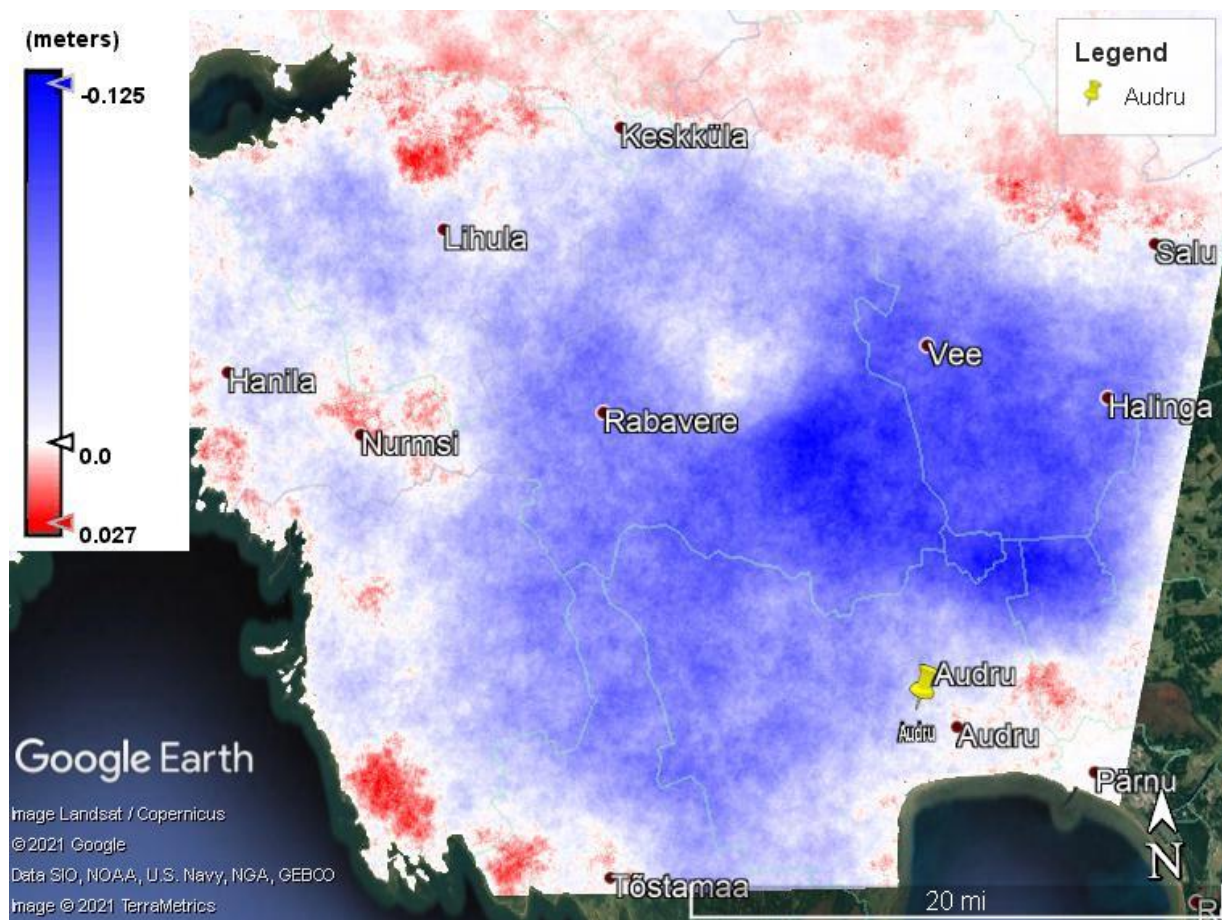
Üldiselt on 2016. aastal Pärnu maakonna sisemaal esinenud maa vajumine. Kõige rohkem maapinna vajumist on esinenud Rabavere piirkonnas. Maapinna kerkimist on esinenud näiteks Tõstamaa kandis rannikualal.

Referentspinnaks, mille suhtes on kõik nihked arvutatud on kasutatud 2015. aasta 13. jaanuari satelliitpilti.

### **5.3. 2017. aasta tulemused**

Antud peatükis on välja toodud tulemused 2017. aasta nihetest.

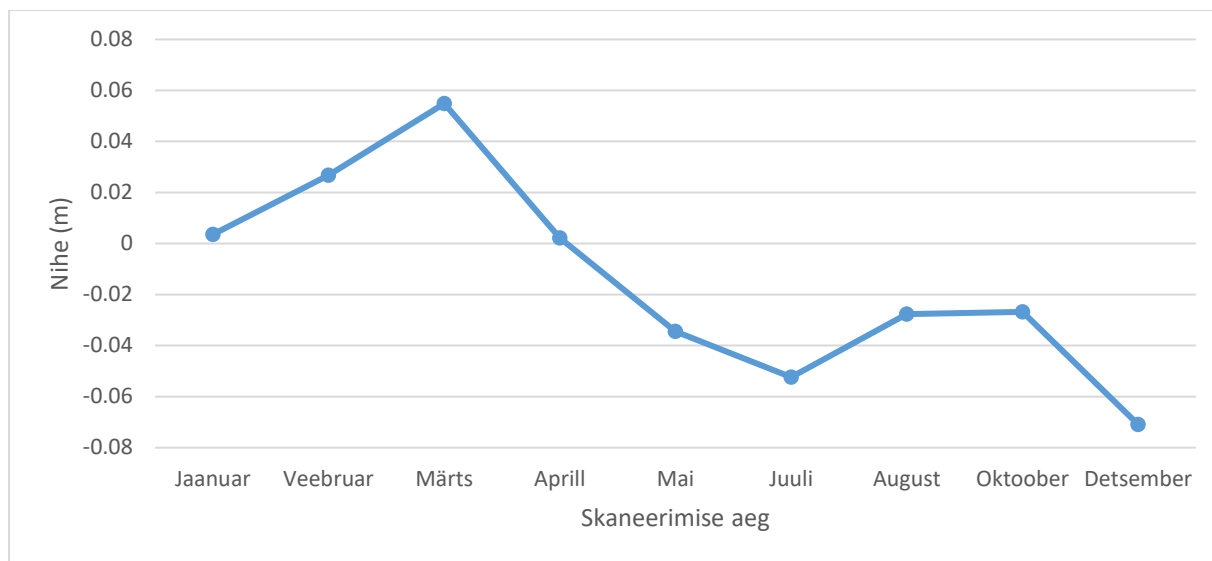
Joonisel 6.7. on näha, et 2017. aastal Pärnu maakonnas on jällegi Rabavere piirkonnas toimunud tugevam maapinna vajumine (12,5 cm), kuid Pärnu maakonna põhja osas on esinenud kerge maapinna kerkimine, nimelt 2,7 cm. Ülejäänud Pärnu maakonnas on üldiselt näha maapinna vajumist. Audru püsijaama ümbruses on statistiliste näitajate (tabel 6.3.) põhjal näha pigem maapinna vajumist. Keskmiseks nihkeks on olnud -1.5 cm, miinumiks ja maksimumiks vastavalt -7,1 cm ja 5,5 cm. Standardhälveks on saadud  $\pm 3.8$  cm. Kui jälgida Audru püsijaama ümbruses nihkeid aasta lõikes (joonis 6.8.), on näha jaanuarist aprillini maapinna kerkimist, aprillist juunini kiirenevat maapinna vajumist ning aasta lõpuni stabiilset vajumist. Koherentsuse (joonis 6.9.) osas on esinenud jällegi aasta esimeses pooles kõikumine (0,15 kuni 0,4) ning teisel poolel on koherentsus olnud stabiilselt 0,15 ja 0,2 vahel.



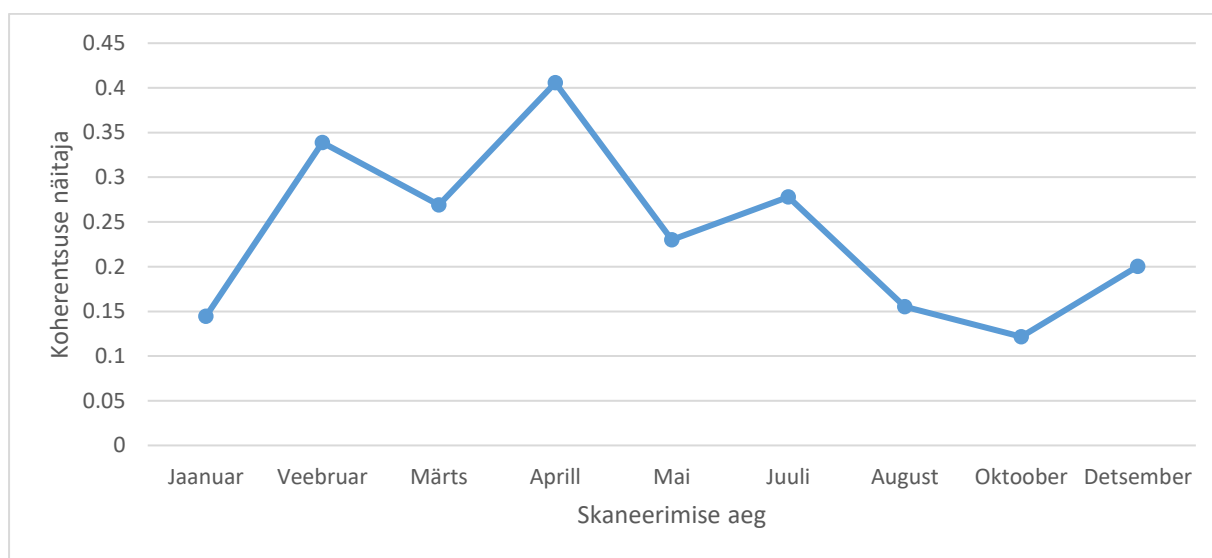
**Joonis 6.7.** Keskmised maapinna LOS nihked Pärnu maakonnas 2017. aastal 2015 aasta jaanuari suhtes

**Tabel 6.3.** Maapinna LOS nihete statistilised näitajad Audru püsijaama ümbruses 2017. aastal 2015 aasta jaanuari suhtes

Keskmine (m)	Miinimum (m)	Maksimum (m)	Standardhälve ( $\pm m$ )
-0.015	-0.071	0.055	0.038



**Joonis6. 8.** Audru püsijaama LOS nihked aastal 2017



**Joonis 6.9.** Audru püsijaama koherentsuse näitajad 2017. aastal

Üldiselt on 2017. aastal Pärnu maakonnas on jällegi toimunud maapinna vajumine v.a. Pärnu maakonna põhja osa.

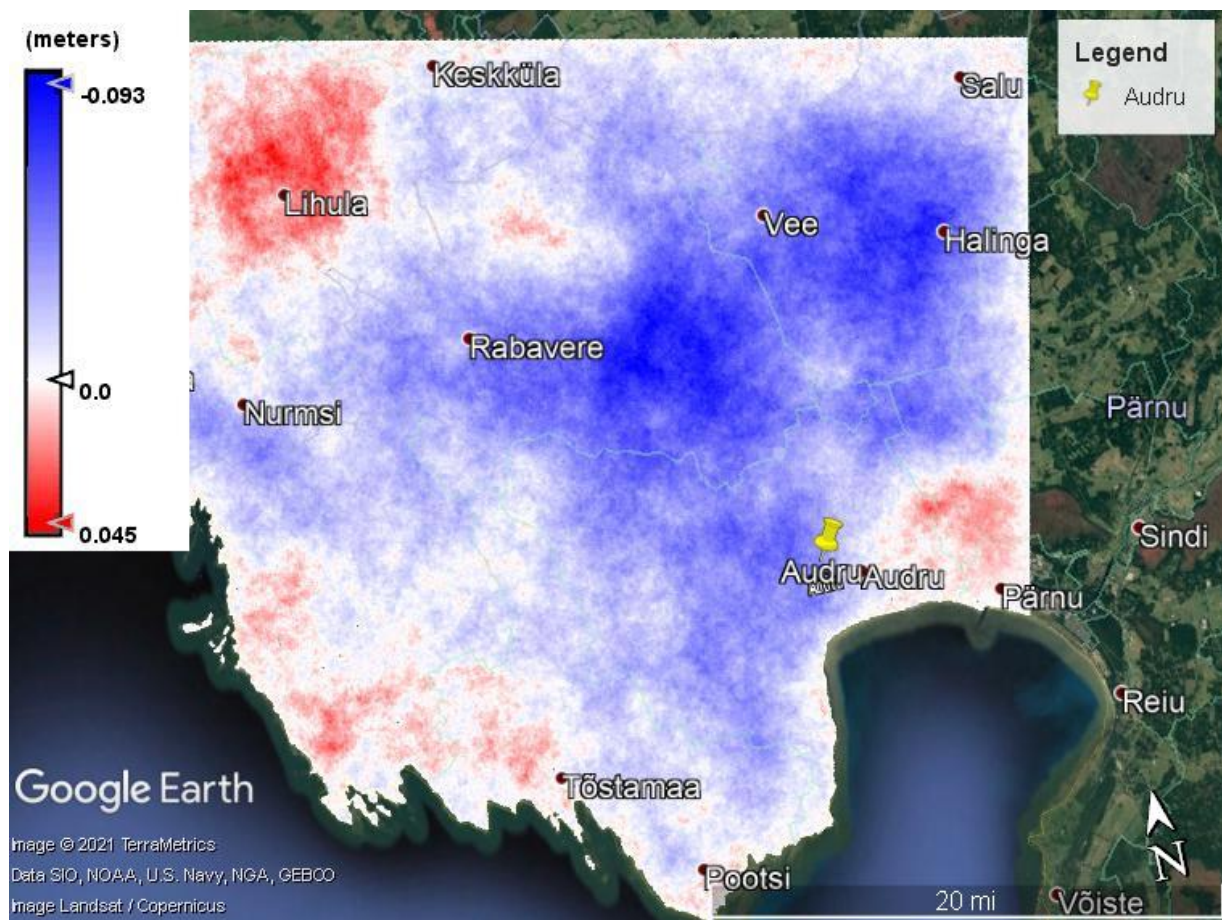
Referentspinnaks, mille suhtes on kõik nihked arvutatud on kasutatud 2015. aasta 13. jaanuari satelliitpilti.

## 5.4. 2018. aasta tulemused

Antud peatükis on välja toodud tulemused 2018. aasta nihetest.

Joonisel 6.10. põhjal on jällegi näha, et Rabavere lähedal (Lavassaare hoiuala) on esinenud maapinna vajumine (kuni -9 cm). Maapinna kerkimine kuni 4,5 cm on tuvastatud Lihula kandis. Samuti on kerge kerkimine näha ka rannikualadel. Mujal sisemaal on jätkuvalt näha maapinna vajumist. Audru püsijaama ümbruses on näha taas maapinna vajumist (tabel 6.4.) (keskmiseks nihkeks on -3.8 cm). Miinimumiks ja maksimumiks on vastavalt -9 ja 3,9 cm ning standardhälbeks  $\pm 4,2$  cm. Aegrea (joonis 6.11.) põhjal on 2018. aastal Audru püsijaama ümbruse maapinna nihked olnud üsna varieeruvad, vahemikus -8 cm kuni 4 cm. Maapinna vajumise aeglustumine on esinenud jaanuarist maini. Maist kuni aasta lõpuni on vajumine olnud üsna stabiilne, v.a. septembri ja detsembri vaheline periood. Koherentsuse näitajad (joonis 6.12.) on olnud üsna stabiilsed, v.a. märtsi kuul ning augusti kuul. Näitajad on jäänud vahemikku 0,1 kuni 0,5.

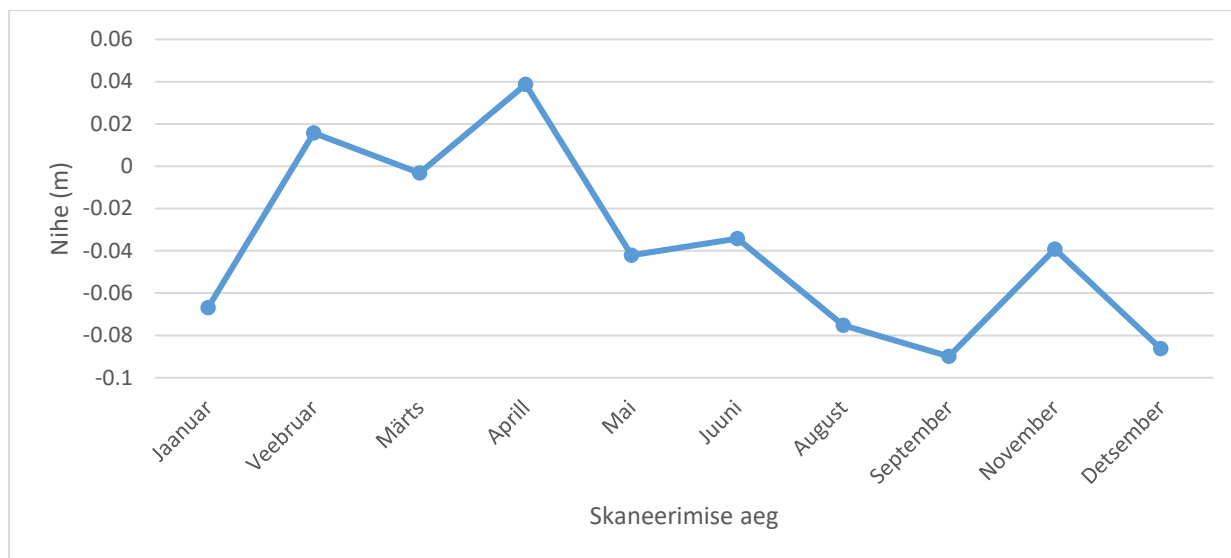




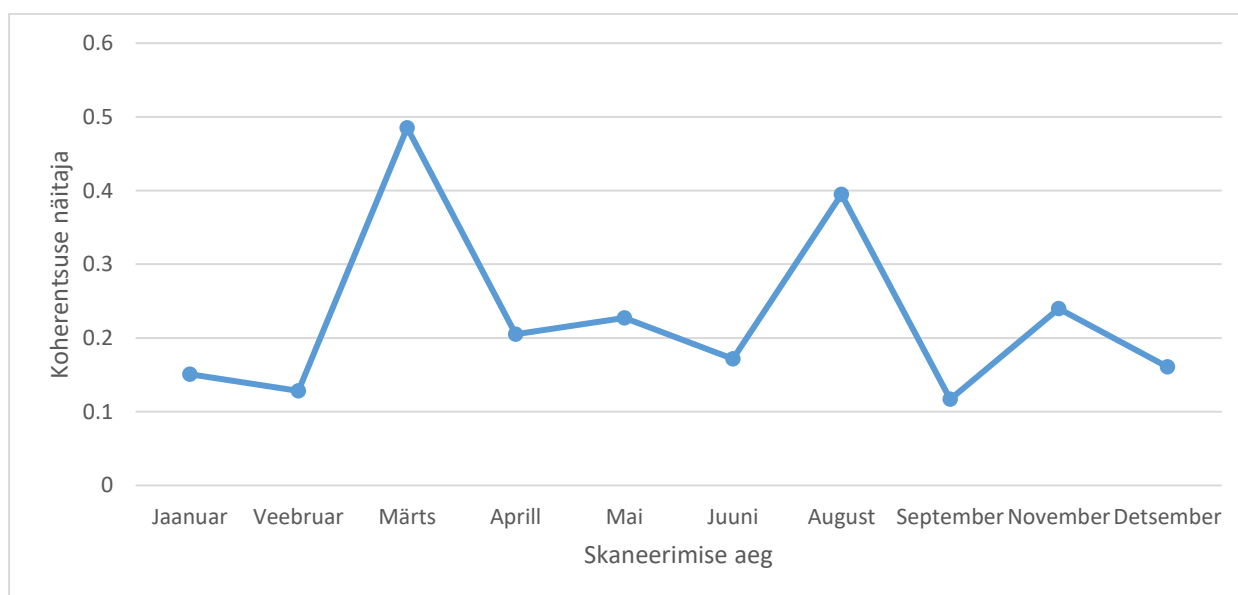
**Joonis 6.10.** Keskmised maapinna LOS nihked Pärnu maakonnas 2018. aastal 2015 aasta jaanuari suhtes

**Tabel 6.4.** Maapinna LOS nihete statistilised näitajad Audru püsijaama ümbruses 2018. aastal 2015 aasta jaanuari suhtes

Keskmine (m)	Miimum (m)	Maksimum (m)	Standardhälve ( $\pm m$ )
-0.038	-0.090	0.039	0.042



**Joonis 6.11.** Audru püsijaama LOS nihked aastal 2018



**Joonis 6.12.** Audru püsijaama koherentsuse näitajad 2018. aastal

Üldiselt on jällegi näha, et Rabavere lähedal (Lavassaare hoiuala) ning mujal sisemaal on esinenud maapinna vajumine. Maapinna kerkimine on esinenud Lihula kandis ning rannikualadel.

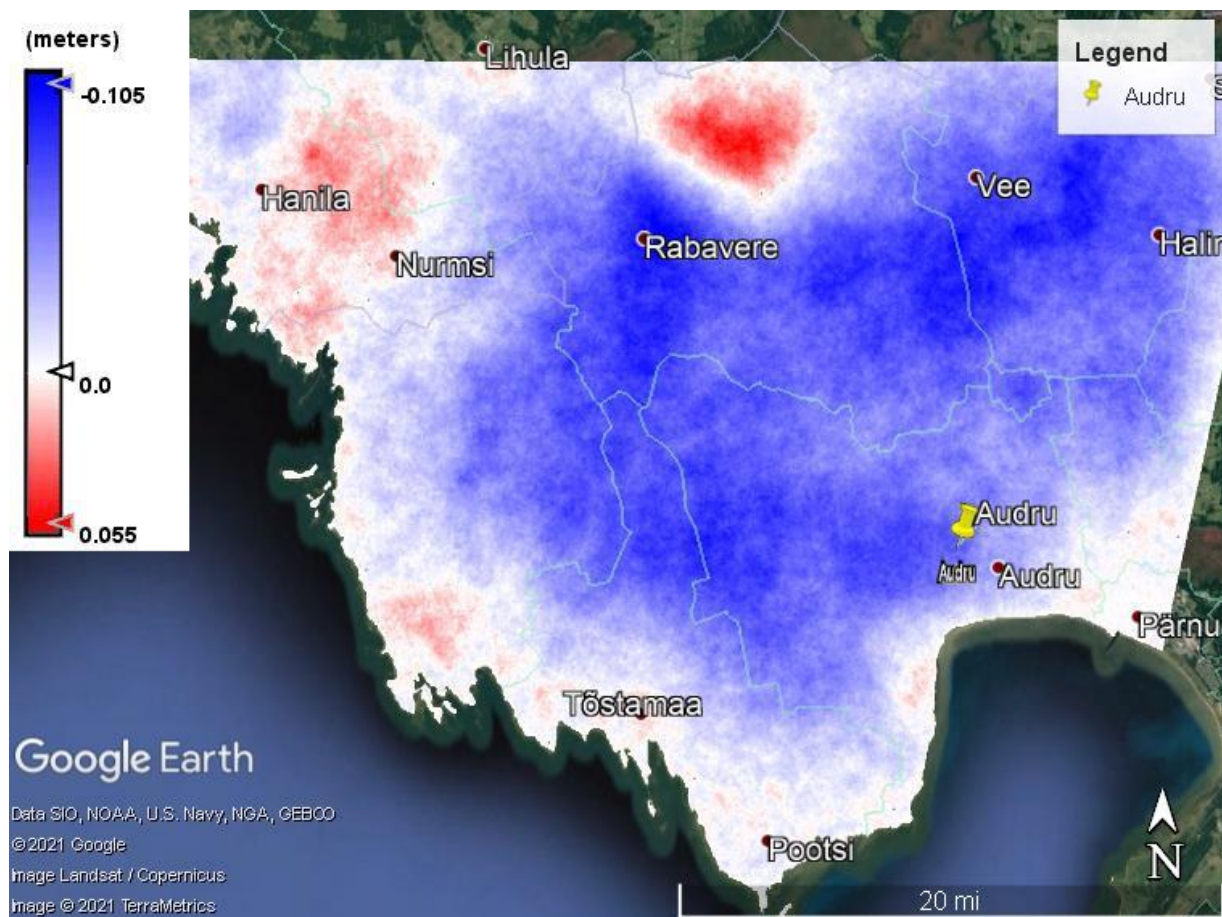
Referentspinnaks, mille suhtes on kõik nihked arvutatud on kasutatud 2015. aasta 13. jaanuari satelliitpilti.



## 5.5. 2019. aasta tulemused

Antud peatükis on välja toodud tulemused 2019. aasta nihetest.

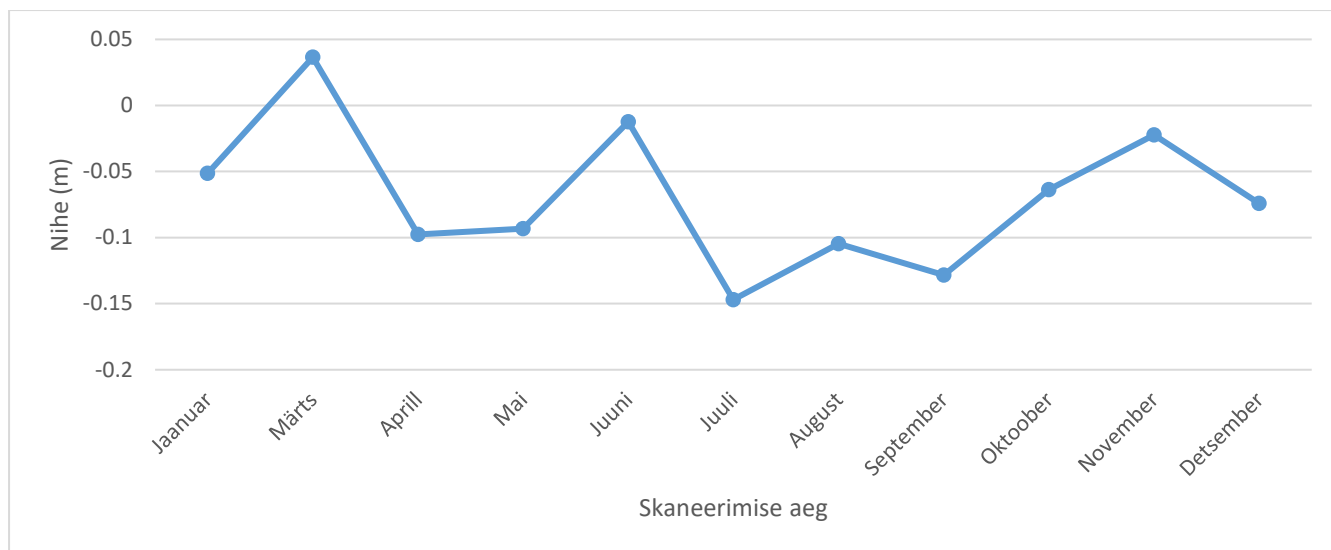
2019. aasta tulemuste (joonis 6.13.) põhjal on maapinna kerkimist tuvastatud Rabavere lähedal ning Hanila piirkonnas. Antud piirkondades on maapind kerkinud kuni 5,5 cm. Kerget maapinna kerkimist on näha ka rannikualal. Ülejäänud Pärnu maakonnas on tuvastatud pigem maapinna vajumist. Audru püsijaama ümbruses (tabel 6.5.) on keskmine maapinna nihe jäänud -6,9 cm juurde. Miinimumiks ja maksimumiks on vastavalt saadud -14,7 cm ja 3,6 cm. Standardhälbeks on saadud  $\pm 5,1$  cm. Nihete aegrea (joonis 6.14.) põhjal on Audru nihked jäänud -15 ja 5 cm vahele. Märtsi kuus on näha maapinna kerkimist, kuid ülejäänud aastal on esinenud maapinna vajumine. Kõige tugevam vajumine on toimunud juuli kuus. Koherentsuse näitajad (joonis 6.15.) on jäänud vahemikku 0,1 kuni 0,35.



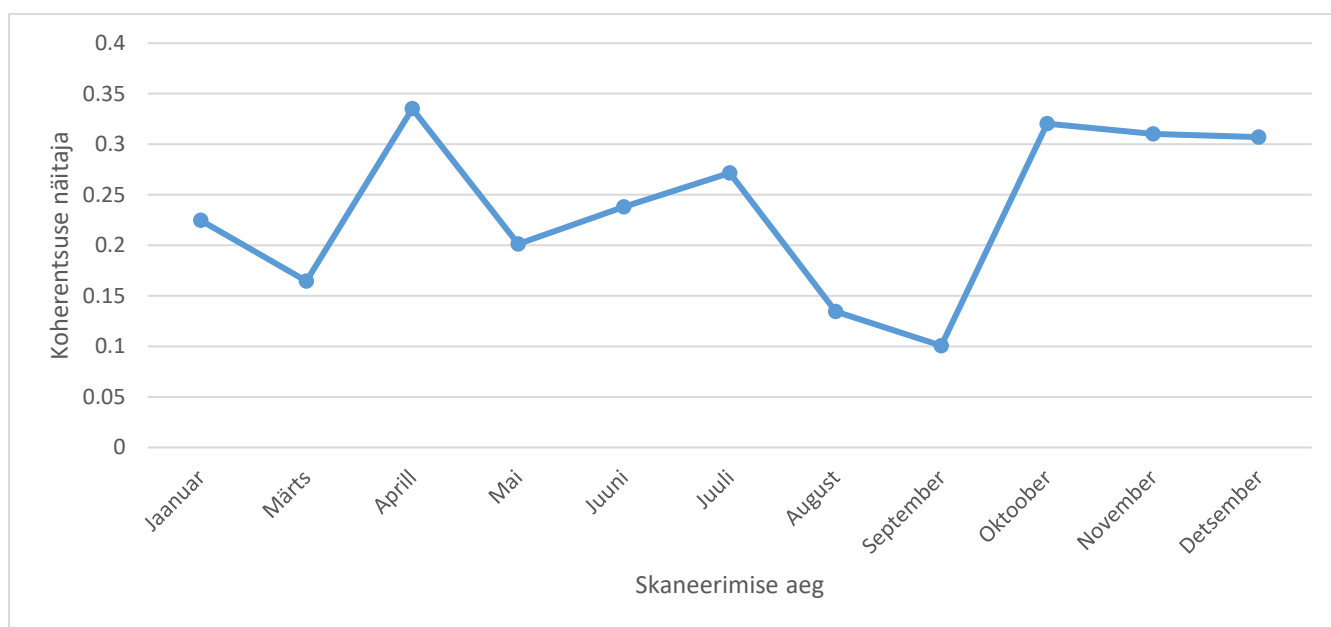
**Joonis 6.13.** Keskmised maapinna LOS nihked Pärnu maakonnas 2019. aastal 2015. aasta jaanuari suhtes

**Tabel 6.5.** Maapinna LOS nihete statistilised näitajad Audru püsijaama ümbruses 2019. aastal 2015 aasta jaanuari suhtes

Keskmine (m)	Miinum (m)	Maksimum (m)	Standardhälve ( $\pm m$ )
-0.069	-0.147	0.036	0.051



**Joonis 6.14.** Audru püsijaama LOS nihked aastal 2019



**Joonis 6.15.** Audru püsijaama koherentsuse näitajad 2019. aastal

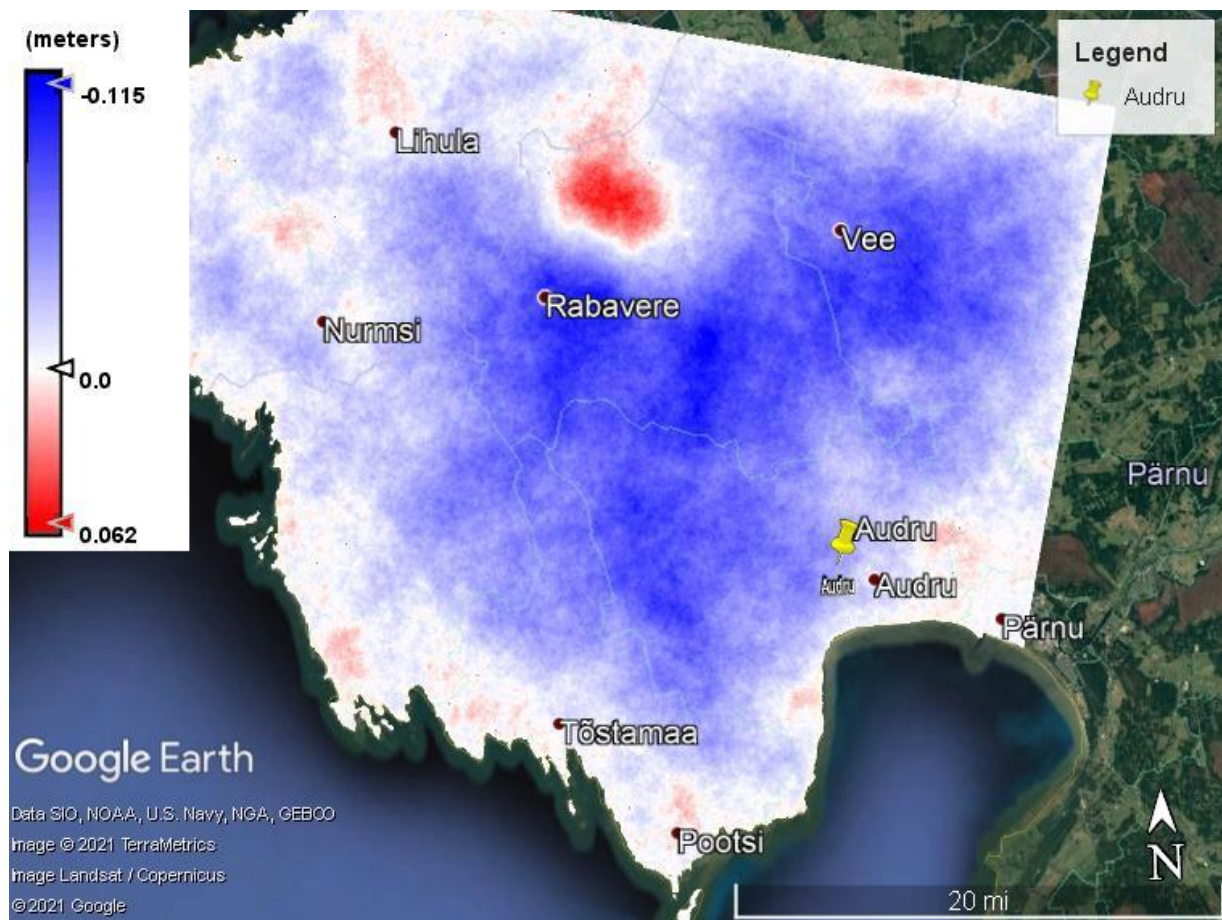
Üldiselt on 2019. aastal Pärnu maakonnas tuvastatud maapinna vajumine, maapinna kerkimist on näha Rabavere lähedal, Hanila piirkonnas ning rannikualadel.

Referentspinnaks, mille suhtes on kõik nihked arvutatud on kasutatud 2015. aasta 13. jaanuari satelliitpilti.

## 5.6. 2020. aasta tulemused

Antud peatükis on välja toodud tulemused 2020. aasta nihetest.

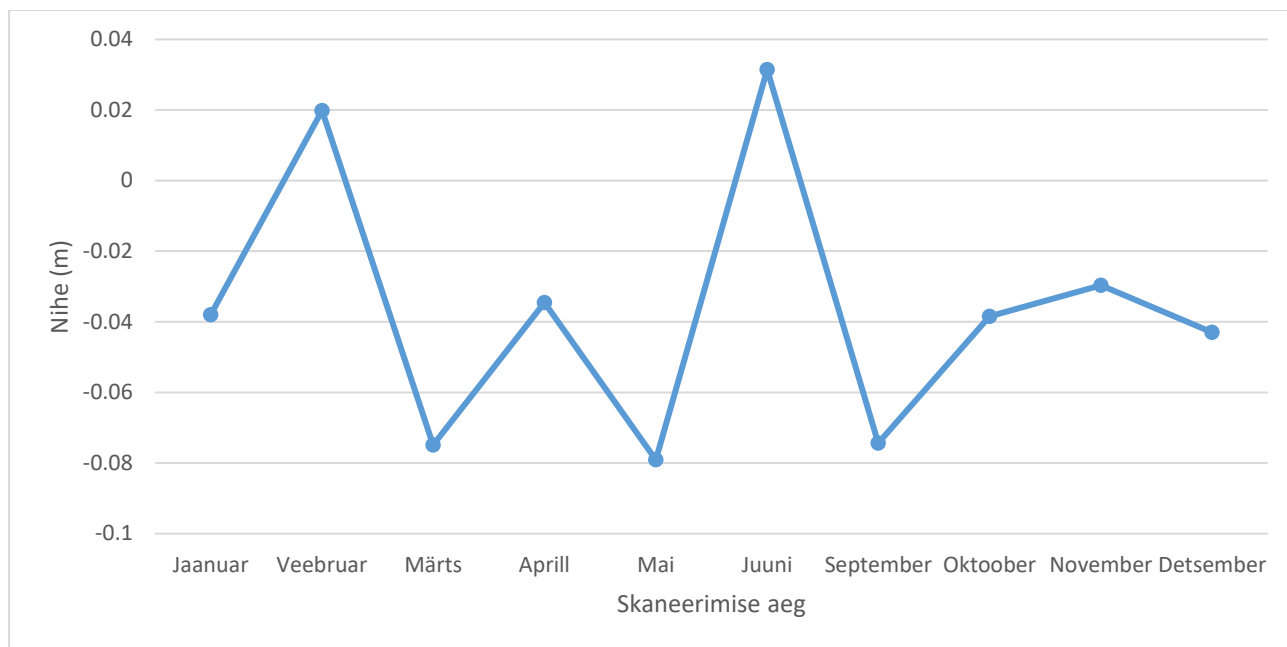
2020. aasta tulemuste (joonis 6.16.) põhjal on näha, et sarnaselt 2019 aasta tulemustele on Rabaverest põhja suunas ning rannikuala piirkonnas märgata maapinna kerkimist. Ülejäänud Pärnu maakonnas on tuvastatud maapinna vajumine. Pärnu maakonna keskmiseks maapinna nihkeks on saadud -3,6 cm, miinimumiks -7,9 cm, maksimumiks 3,1 cm ning standardhälbeks  $\pm 3,6$  cm (tabel 6.6.). Nihete stabiilsuse aegrea põhjal (joonis 6.17.) on näha, et 2020. aasta tulemused varieeruvad suures osas. Suuremad maapinna nihke varieeruvused on olnud veebruari ning juuni kuus, vastavalt maapinna kerkimine 2 ja 3 cm. Ülejäänud aasta lõikes on toimunud maapinna vajumine. Aasta lõpus (september kuni detsember) on maapinna vajumine olnud stabiilne. Koherentsuse näitajad (joonis 6.18.) on jäänud vahemikku 0,1 kuni 0,35.



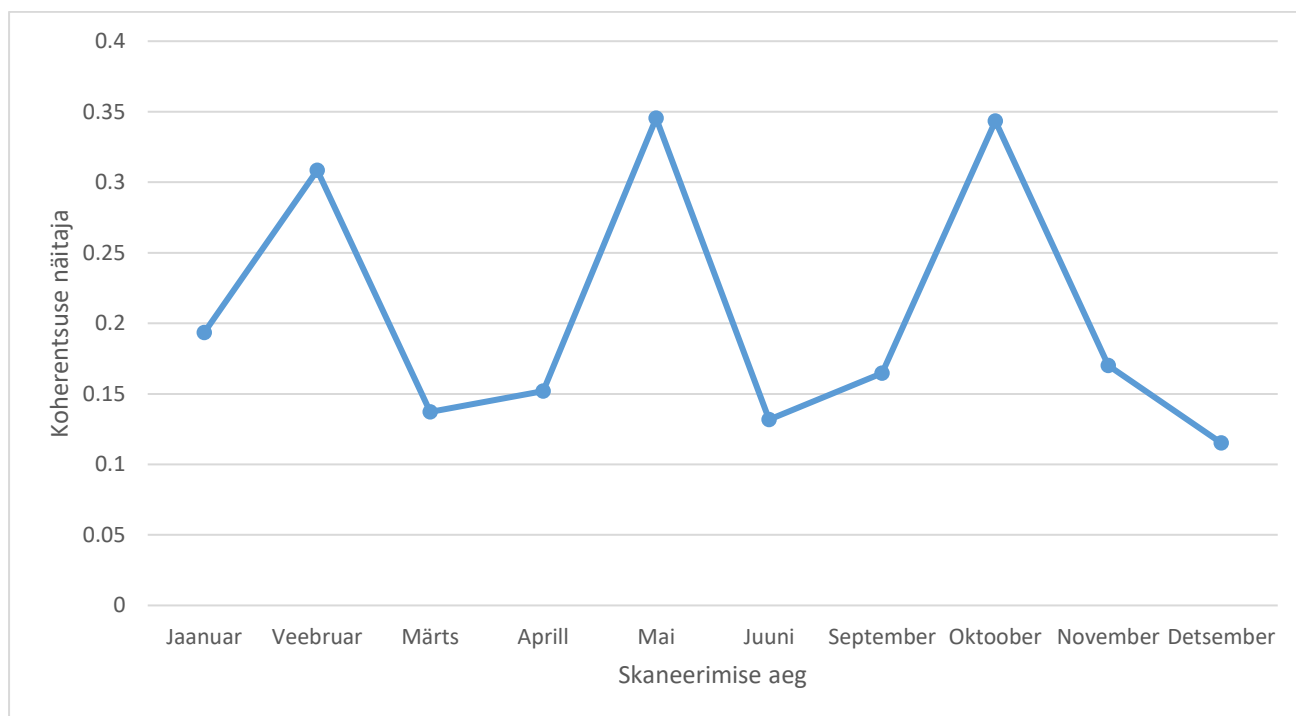
**Joonis 6.16.** Keskmised maapinna LOS nihked Pärnu maakonnas 2020. aastal 2015. aasta jaanuari suhtes

**Tabel 6.6.** Maapinna LOS nihete statistilised näitajad Audru püsijaama ümbruses 2020. aastal 2015 aasta jaanuari suhtes

Keskmine (m)	Miinum (m)	Maksimum (m)	Standardhälve ( $\pm$ m)
-0.036	-0.079	0.031	0.036



**Joonis 6.17.** Audru püsijaama LOS nihked aastal 2020



**Joonis 6.18.** Audru püsijaama koherentsuse näitajad 2020. aastal

Üldiselt on 2020. aastal toimunud maapinna vajumine, v.a. Rabaverest põhja suunas ning rannikuala piirkonnas.

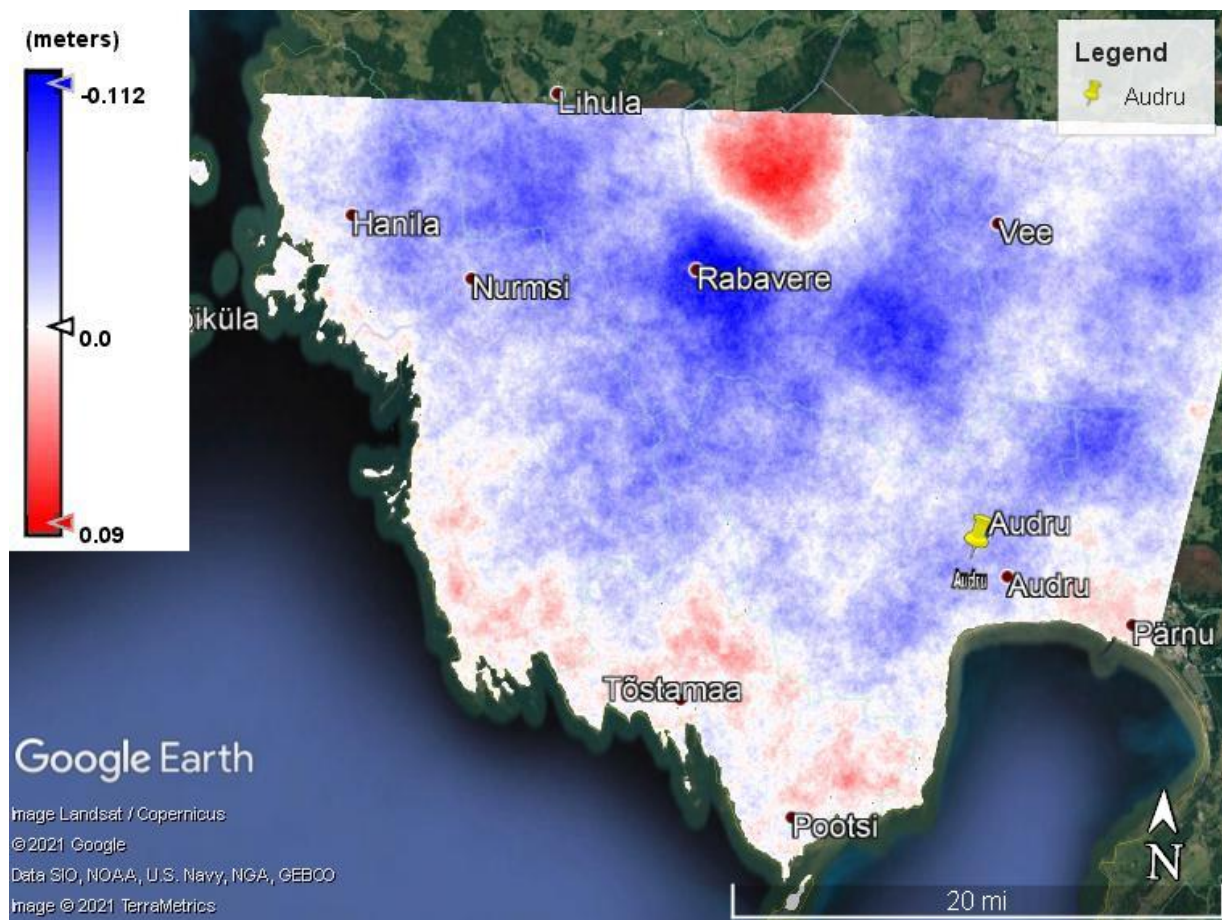
Referentspinnaks, mille suhtes on kõik nihked arvutatud on kasutatud 2015. aasta 13. jaanuari satelliitpilti.

## **5.7. 2021. aasta tulemused**

Antud peatükis on välja toodud tulemused 2021. aasta nihetest.

Joonisel 6.19. on 2021. aastal taas sarnaselt 2020. ja 2019. aastale näha Pärnu maakonnas maapinna kerkimist Rabaverest põhja suunas ning rannikuala piirkonnas. Kõige suurem maapinna vajumine on aga tuvastatud Rabavere ümbruses. Statistiliste näitajate (tabel 6.7.) põhjal on Pärnu maakonnas keskmiselt maapinna vajumine -3 cm. Maksimumiks ja miinimumiks on vastavalt -7,8 ja 3,5 cm ning standardhälbeks  $\pm 3,8$  cm. Joonisel 6.20. põhjal saab öelda, et 2021. aasta jooksul esineb ainult maapinna vajumine, v.a. märtsi kuu, kus maapind on kerkinud 3,5 cm võrra. Koherentsuse näitajad (joonis 6.21.) on olnud vahemikus 0,1 kuni 0,3.



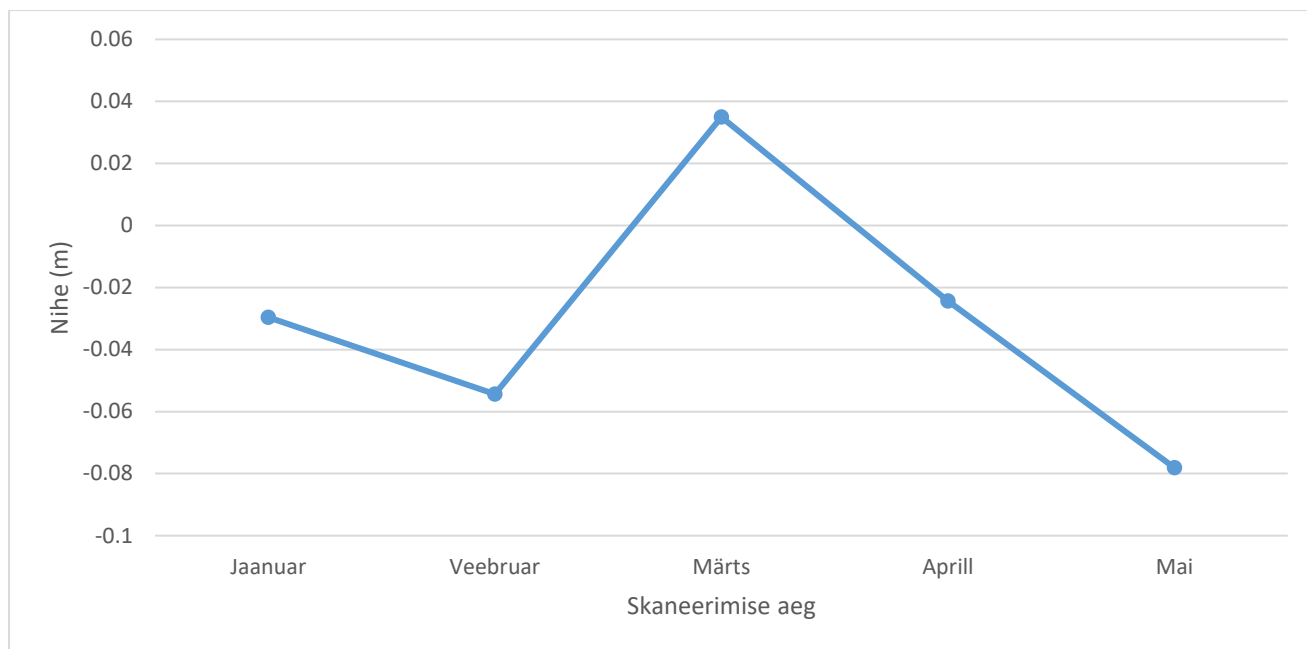


**Joonis 6.19.** Keskmised maapinna LOS nihked Pärnu maakonnas 2021. aastal 2015. aasta jaanuari suhtes

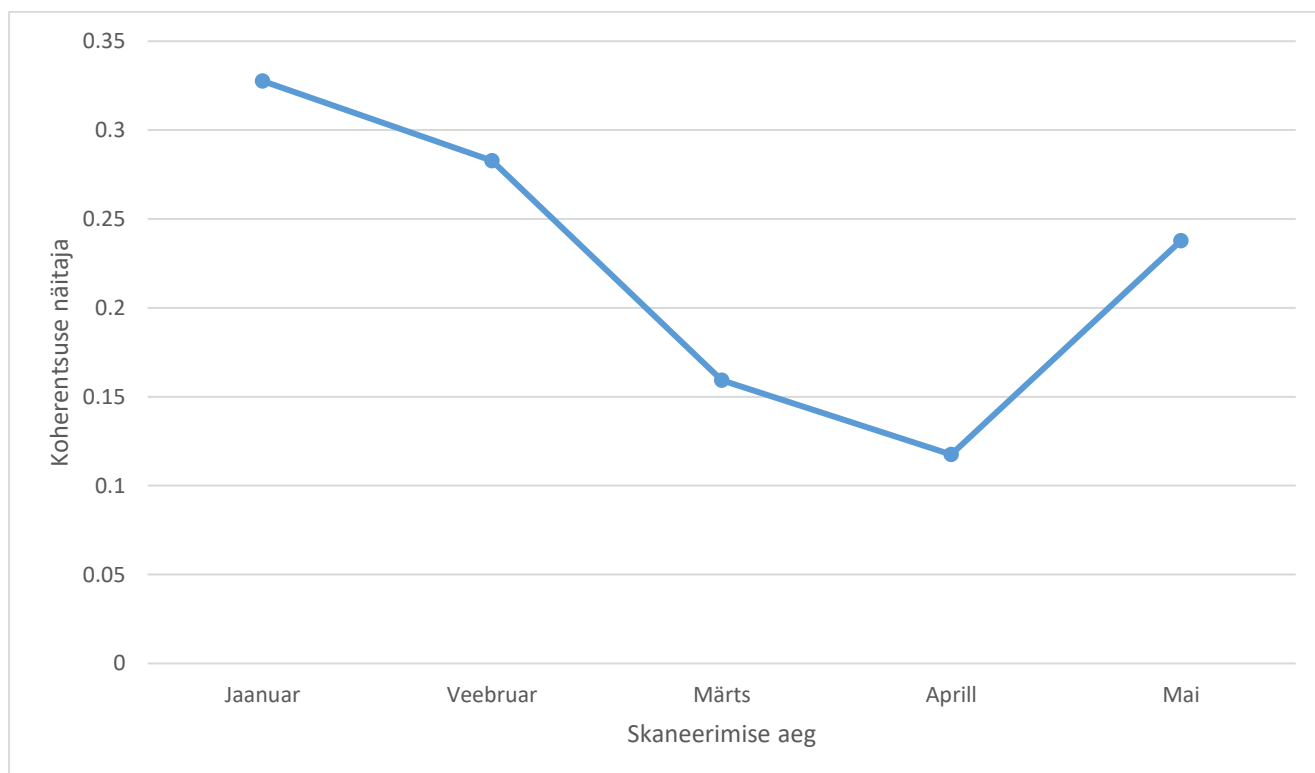
**Tabel 6.7.** Maapinna LOS nihete statistilised näitajad Audru püsijaama ümbruses 2021. aastal 2015 aasta jaanuari suhtes

Keskmine (m)	Miimum (m)	Maksimum (m)	Standardhälve ( $\pm m$ )
-0.030	-0.078	0.035	0.038





**Joonis 6.20.** Audru püsijaama LOS nihked aastal 2021



**Joonis 6.21.** Audru püsijaama koherentsuse näitajad 2021. aastal

Üldiselt on 2021. aastal taas Pärnu maakonnas toimund maapinna vajumine. Maapinna kerkimine on esinenud Rabaverest põhja suunas ning rannikuala piirkonnas.

Referentspinnaks, mille suhtes on kõik nihked arvutatud on kasutatud 2015. aasta 13. jaanuari satelliitpilti.

## 5.8. 2015-2021 aasta tulemused

Tulemuste põhjal (tabel 6.8.) põhjal saab öelda, et keskmine nihe Audru püsijaama ümbruses on aastatel 2015-2016 suurenenud, nimelt -2 cm pealt -3,6 cm peale. 2017 aastal on nihe vähenenud -1,5 cm ning 2018 aastal jälle suurenenud. Aastal 2019 on tekkinud tugev nihke suurenemine -6,9 cm peale. Aastatel 2020 ja 2021 on keskmised nihked taas stabiliseerinud. Ka miinimumi ning standardhälbe põhjal võib öelda, et kõige suurem maapinna vajumine on esinenud 2019. aasta juuli kuus. Antud kuul on koherentsuse näitaja olnud 0.25. Kõige aeglasem maapinna vajumine on esinenud 2015. aastal, kus tulemuste varieeruvus oli samuti kõige väiksem. Standardhälbeks on sellel aastal saadud  $\pm 1,6$  cm ning miinimumiks ja maksimumiks vastavalt -4,2 cm ja 0,5 cm.

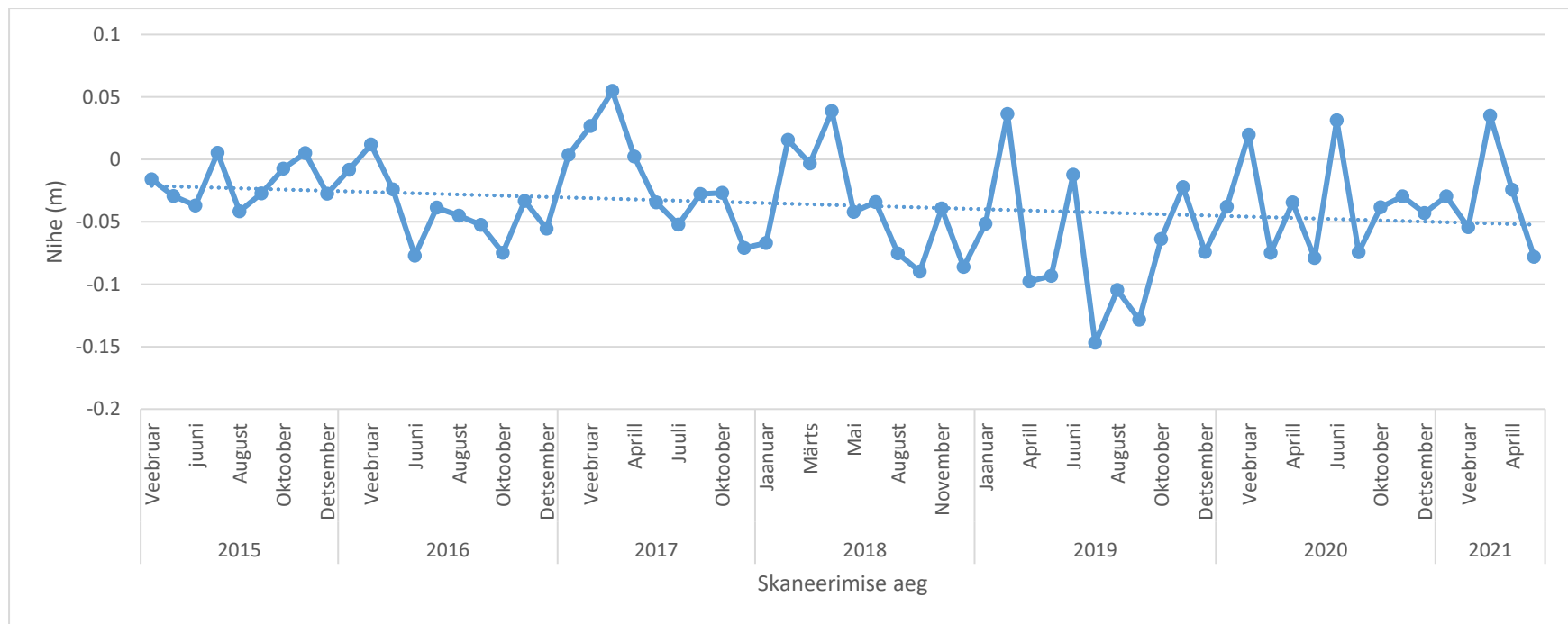
**Tabel 6.8.** Audru püsijaama ümbruses esinenud nihete statistilised näitajad aastatel 2015-2021 2015 aasta jaanuari suhtes

	Keskmine (m)	Miinum (m)	Maksimum (m)	Standardhälve ( $\pm m$ )
<b>2015</b>	-0.020	-0.042	0.005	0.016
<b>2016</b>	-0.036	-0.077	0.012	0.028
<b>2017</b>	-0.015	-0.071	0.055	0.038
<b>2018</b>	-0.038	-0.090	0.039	0.042
<b>2019</b>	-0.069	-0.147	0.036	0.051
<b>2020</b>	-0.036	-0.079	0.031	0.036
<b>2021</b>	-0.030	-0.078	0.035	0.038

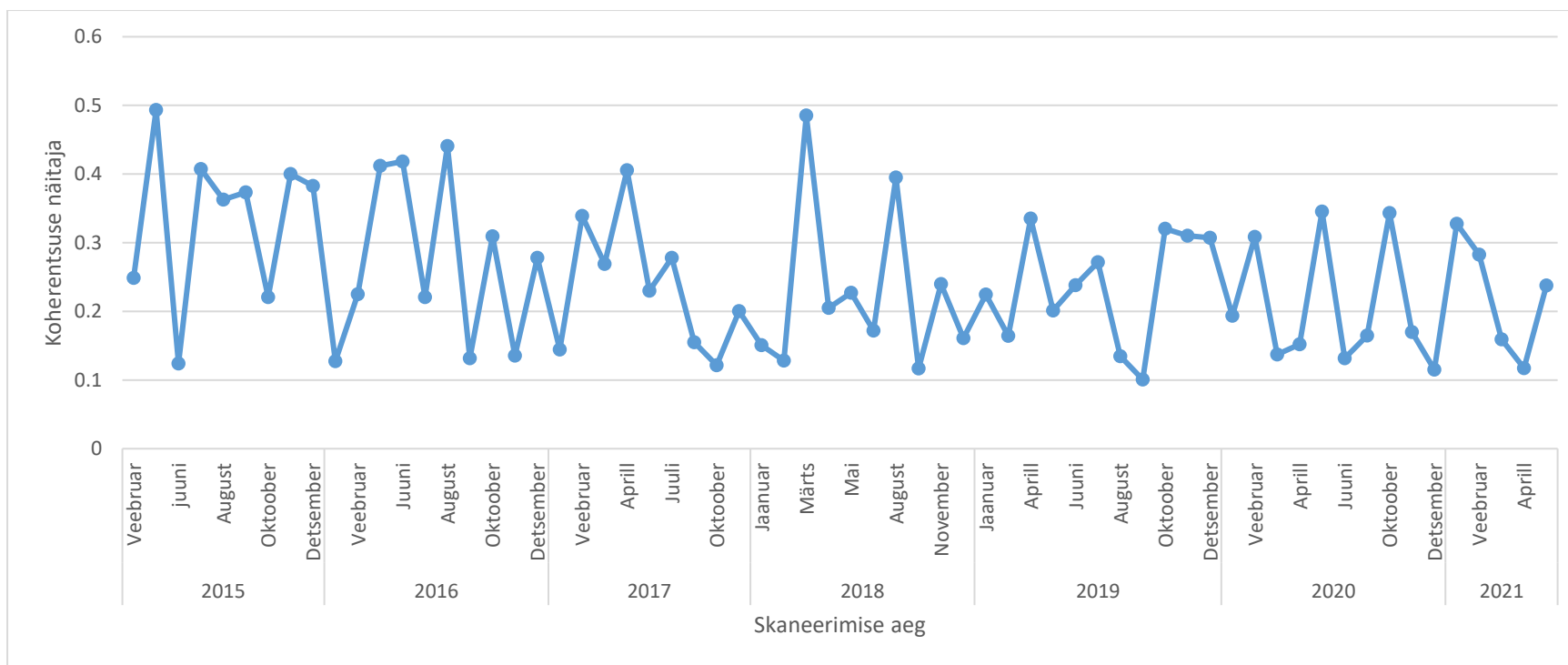
Joonise 6.22. põhjal on näha, et üldiselt on nihked Audru püsijaama ümbruses aastatel 2015-2021 olnud üsna stabiilsed. Eranditeks on olnud 2017-2021 aastate veebruari-märtsi kuud.

Antud kuudel on märgata maapinna kerkimist. Suurem maapinna vajumine on esinenud 2019. aasta juulis.

Koherentsusnäitajatest (joonis 6.23) võib järeldada, et suures osas on näitaja kehvem olnud talvel, kesksuvel ning osaliselt ka sügisel. Selle põhjuseks võivad olla atmosfäärilised tingimused, näiteks talvel ning sügisel on suurem niiskus. Samuti võivad tulemused olla mõjutatud taimkatte kasvust (kesksuvel). Üldiselt on siiski koherentsuse näitaja olnud tugevalt kõikuv. Paremate tulemuste saavutamiseks oleks võimalik ka töödeldud piltide arvu suurendada ning ajalist jaotust vähendada.



**Joonis 6.22.** Audru püsijaama LOS nihked aastatel 2015-2021



**Joonis 6.23.** Audru püsijaama koherentsuse näitajad aastatel 2015-2021

## KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on kontrollida Audru GNSS püsijaama stabiilsust InSAR kaugseire meetodi abil määraes maapinna deformatsioone jaama ümbruses.

Töö sisaldab ülevaateid radari ja tehisavaradari (SAR) ajaloost ning tehisavaradari tööpõhimõtetest ja omadustest. Samuti on antud ülevaade erinevatest SAR tehnikatest, kasutusvaldkondadest ning InSAR meetodi veaallikatest. Lisaks on antud ka ülevaade Sentinel-1 satelliitmissioonist.

Uurimistöö eesmärgi saavutamiseks hangiti 66 Sentinel-1 satelliitmissiooni satelliidipilti aastatel 2015-2021 Euroopa Kosmoseagentuuri Copernicus keskkonnast. Eesmärgiks oli hankida pilt iga kuu kohta, kuid tehniliste probleemide tõttu jäid mõningad pildid hankimata. Hangitud pildid töödeldi läbi InSAR meetodil kasutades programmi SNAP. Referentspildina kasutati 2015. aasta 13. jaanuari pilti. Töödeldud produktist saadud tulemused hõlmasid iga uuritud aasta kohta visualiseeritud nihete kaarti Pärnu maakonnast. Täpsemalt uuriti Audru GNSS püsijaama ümbruses olevaid nihkeid. Selleks arvutati aastate lõikes nihete aritmeetiline keskmine, miinimum, maksimum ning standardhälve ning aastate lõikes aegread nihete ning koherentsuse näitaja kohta.

Saavutatud tulemuste põhjal võib väita, et uuritud aastatel on Pärnu maakonnas toimunud pigem maapinna vajumine, eriti uuritava ala keskosas. Maapinna kerkimine on esinenud looduskaitsealadel ning rannikualadel. Nihked on olnud vahemikus -15,8 cm kuni +9 cm. Audru püsijaama ümbruses on maapinna vajumine olnud üsna stabiilne (nihked vahemikus -3 ja -4 cm), v.a. 2017. ja 2019. aastal. 2017. aastal on maapinna vajumine aeglustunud ning 2019 aastal on maapinna vajumine kiirenenud. Aritmeetilised keskmised on antud aastatel olnud vastavalt -1,5 cm ja -6,9 cm. 2019. aastal on ka standardhälve olnud suurem, nimelt  $\pm 5,1$  cm.

Kokkuvõttes saab öelda, et Audru GNSS püsijaama ümbruses on maapind üsna stabiilne. Suuremad varieeruvused on esinenud ainult aastatel 2015 ja 2019.

Uurimistöö valmimisel tekkisid ka mõningad probleemid. Copernicus keskkonna tehniliste probleemide tõttu ei olnud võimalik Audru GNSS püsijaama ümbruses saada 2015-2021 aasta iga kuu kohta satelliitpilti. Optimaalsemate tulemuste saamiseks võiks kasutuses olla suurem hulk satelliitpilte väiksema ajajaotusega. Samuti annaks eeldatavasti paremad tulemused püsipeegeldajate meetodi kasutamine, kuna InSAR meetodiga võivad kaasneda tugevad atmosfäärast ning kliimast tekkivad vead.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Aslan, G., Foumelis, M., Raucoules, D., Michele, D.M., Bernardie, S., Cakir, Z.** (2020). Landslide Mapping and Monitoring Using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique in the French Alps. - *Remote Sensing*. Vol. 12, No. 8. [WWW] <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/8/1305#cite> (30.03.2021)
2. **Bamler, R.** (2000). PRINCIPLES OF SYNTHETIC APERTURE RADAR. - *Surveys in Geophysics*. Vol. 21, pp 147-157. [WWW] [https://link.springer.com/article/10.1023/A:1006790026612#:~:text=Synthetic%20Aperture%20Radar%20\(SAR\)%20is,resolutionsof%2010%20to%2050%20m](https://link.springer.com/article/10.1023/A:1006790026612#:~:text=Synthetic%20Aperture%20Radar%20(SAR)%20is,resolutionsof%2010%20to%2050%20m). (29.03.2021)
3. **Beladam, O., Balz, T., Mohamadi, B., Abdalhak, M.** (2019). Using PS-InSAR with Sentinel-1 Images for Deformation Monitoring in Northeast Algeria. – *Geosciences*. Vol. 9, No. 7. [WWW] <https://www.mdpi.com/2076-3263/9/7/315/htm> (30.03.2021)
4. **Braun, A.** (2020). Time-series analysis with Sentinel-1 – *SkyWatch Space Applications Inc.* [WWW] <http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20Time-series%20analysis%20with%20Sentinel-1.pdf> (17.05.2021)
5. **Braun, A., Veci, L.** (2020). TOPS Interferometry Tutorial – *SkyWatch Space Applications Inc.* [WWW] [http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial\\_v2.pdf](http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial_v2.pdf) (17.05.2021)
6. **Boerner, W.-M.** (2007). Basics of SAR Polarimetry I. Nato research and technology organization (toim) - *Radar Polarimetry and Interferometry*, pp. 3-1 – 3-40, Neuilly-sur-Seine, France. [WWW]



- [https://www.researchgate.net/publication/235089924\\_Basics\\_of\\_SAR\\_Polarimetry\\_I](https://www.researchgate.net/publication/235089924_Basics_of_SAR_Polarimetry_I)  
(30.03.2021)
7. **Chan, K.Y., Koo, C.V.** (2008). AN INTRODUCTION TO SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR). - *Progress In Electromagnetics Research B*. Vol. 2, pp 27-60. [WWW] <https://www.jpier.org/PIERB/pierb02/03.07110101.pdf> (29.03.2021)
  8. Copernicus Open Access Hub. (2021). - The European Space Agency. [WWW] <https://scihub.copernicus.eu/> (17.05.2021)
  9. **Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F.** (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. - *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 38, No. 5, pp. 2202- 2212. [WWW] [https://www.researchgate.net/publication/3202453\\_Nonlinear\\_subsidence\\_rate\\_estimation\\_using\\_permanent\\_scatterers\\_in\\_differential\\_SAR\\_Interferometry](https://www.researchgate.net/publication/3202453_Nonlinear_subsidence_rate_estimation_using_permanent_scatterers_in_differential_SAR_Interferometry) (31.03.2021)
  10. **Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F.** (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. - *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 39, No. 1. [WWW] [https://www.researchgate.net/publication/3202520\\_Permanent\\_scatterers\\_in\\_SAR\\_interferometry\\_IEEE\\_Trans\\_Geosci\\_Remot\\_Sen](https://www.researchgate.net/publication/3202520_Permanent_scatterers_in_SAR_interferometry_IEEE_Trans_Geosci_Remot_Sen) (31.03.2021)
  11. Google Earth. (2020). - Google. [WWW] <https://www.google.com/earth/> (17.05.2021)
  12. **Hanssen, F.R.** (2003) SUBSIDENCE MONITORING USING CONTIGUOUS AND PS INSAR: QUALITY ASSESSMENT BASED ON PRECISION AND RELIABILITY. - *Proceedings of 11th FIG Symposium on Deformation Measurements*. Santorini, Greece. [WWW] [http://fig.net/resources/proceedings/2003/santorini\\_comm6/C-INSAR/C2.pdf](http://fig.net/resources/proceedings/2003/santorini_comm6/C-INSAR/C2.pdf)  
(30.03.2021)
  13. **Höser, T.** (2018). Analysing the Capabilities and Limitations of InSAR using Sentinel-1 data for Landslide Detection and Monitoring. (Magistritöö). University of Bonn Department

- of Geography. Bonn. [WWW] [https://www.researchgate.net/publication/327939547 Analysing the Capabilities and Limitations of InSAR using Sentinel-1 Data for Landslide Detection and Monitoring](https://www.researchgate.net/publication/327939547_Analysing_the_Capabilities_and_Limitations_of_InSAR_using_Sentinel-1_Data_for_Landslide_Detection_and_Monitoring) (30.03.2021)
14. InSAR AT A GLANCE. (2021). TRE ALTAMIRA. [WWW] <https://site.tre-altamira.com/insar/> (30.03.2021)
15. Interferometry. (2021). – The European Space Agency. [WWW] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-overview/interferometry> (30.03.2021)
16. Interferometric Wide Swath. (2021). – The European Space Agency. [WWW] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath> (30.03.2021)
17. Level-1. (2021). – The European Space Agency. [WWW] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-types-processing-levels/level-1> (30.03.2021)
18. **Marinkovic, S.P., Leijen V.F., Ketelaar, G., Hanssen, F.R.** (2005). Recursive data processing and data volume minimization for PS-InSAR. – *Proceedings of IGARSS 2005. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Vol. 4. [WWW] [\(PDF\) Recursive data processing and data volume minimization for PS-InSAR \(researchgate.net\)](#) (30.03.2021)
19. **Moreira, A.** (2013). Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications. - *Proceedings of 4th Advanced Training Course In Land Remote Sensing*. Athens, Greece. [WWW] <https://earth.esa.int/documents/10174/642943/6-LTC2013-SAR-Moreira.pdf> (29.03.2021)

20. **Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., Papathanassiou, P.K.** (2013). A Tutorial on Synthetic Aperture Radar. - *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*. Vol. 1, No. 1 pp 6-43. [WWW] [https://www.researchgate.net/publication/257008464\\_A\\_Tutorial\\_on\\_Synthetic\\_Aperture\\_Radar](https://www.researchgate.net/publication/257008464_A_Tutorial_on_Synthetic_Aperture_Radar) (29.03.2021)
  
21. Overview. (2021). – The European Space Agency. [WWW] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/overview> (30.03.2021)
  
22. **Paek, W.S.** (2020). Synthetic Aperture Radar. [WWW] [\(PDF\) Synthetic Aperture Radar \(researchgate.net\)](#) (29.03.2021)
  
23. **Qin, Y., Perissin, D., Milillo, P.** (2017). A new era of InSAR applications with Sentinel-1: A case study of severe ground subsidence in California Central Valley. - *Proceedings of IGARSS 2017. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Forth Worth, USA. [WWW] [\(PDF\) A new era of InSAR applications with Sentinel-1: A case study of severe ground subsidence in California Central Valley \(researchgate.net\)](#) (30.03.2021)
  
24. **Rosen, A.P., Hensley, S., Joughin, R.I., Li, K.F., Madsen, N.S., Rodriguez, E., Goldstein, M.R.** (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry. – *Proceedings of The IEEE*, Vol. 88, No. 3, pp. 333-382. [WWW] [https://www.researchgate.net/publication/2985669\\_Synthetic\\_Aperture\\_Radar\\_Interferometry](https://www.researchgate.net/publication/2985669_Synthetic_Aperture_Radar_Interferometry) (30.03.2021)
  
25. Satellite Missions Database. (2021). – ESA Earth Observation Portal. [WWW] <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions> (20.05.2021)
  
26. Synthetic Aperture Radar (SAR) Satellites. (2021). – UNAVCO. [WWW] <https://www.unavco.org/instrumentation/geophysical/imaging/sar-satellites/sar-satellites.html> (20.05.2021)

27. **Younis, M.** (2015). Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications. - *Proceedings of 6th ESA Advanced Training Course On Land Remote Sensing*. Bucharest, Romania. [WWW] [https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2021/02/D1T2a\\_LTC2015\\_Younis.pdf](https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2021/02/D1T2a_LTC2015_Younis.pdf) (31.03.2021)

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Tauri Taaleš,  
(sünnipäev 24/09/1993 39309245731)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö  
Audru GNSS püsijaama stabiilsuse kontrollimine InSAR kaugseire põhjal määratud maapinna  
deformatsioonidega,  
mille juhendaja on dotsent Tarmo Kall,
  - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
  - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
  - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega  
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu, \_\_\_\_\_  
(kuupäev)

---

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)